

FIRE and EXPLOSION
SAFETY

ПОЖАРОВЗРЫВО-

БЕЗОПАСНОСТЬ



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ISSN 0869-7493 (Print)
ISSN 2587-6201 (Online)

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



ОБ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОГО
СЛЕДОВАНИЯ АВТОМОБИЛЯ
ЭКСТРЕННОЙ СЛУЖБЫ В СЛОЖНЫХ
ДОРОЖНЫХ УСЛОВИЯХ



УЧРЕДИТЕЛЬ и ИЗДАТЕЛЬ —

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Адрес:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Журнал издается с 1992 г., периодичность — 6 номеров в год.

СМИ зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций — свидетельство ПИ № ФС 77-79402 от 02 ноября 2020 г. Префикс DOI: 10.22227

РЕДАКЦИЯ:

Выпускающий редактор **Дядичева А.А.**
Редактор **Махиянова Е.Б.**
Перевод на английский **Юденкова О.В.**
Корректор **Светличная Л.В.**
Дизайнер **Алейникова А.Г.**

Адрес редакции:

129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

Адрес для переписки:

121352, Россия, г. Москва, а/я 26.

Тел./факс: +7 (495) 228-09-03,
+7 (909) 940-01-85.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК России для публикации трудов соискателей ученых степеней, в Реферативный журнал и базы данных ВИНТИ РАН, в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), в Справочно-библиографическую службу EBSCO. Сведения о журнале ежегодно публикуются в Международной справочной системе по периодическим и продолжающимся изданиям «Ulrich's Periodicals Directory». Переводные версии статей журнала входят в Международный реферативный журнал Chemical Abstracts.

Перепечатка материалов журнала «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety» только по согласованию с редакцией. При цитировании ссылка не обязательна. Авторы и рекламодатели несут ответственность за содержание представленных в редакцию материалов и публикацию их в открытой печати. Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов опубликованных материалов.

Подписано в печать 27.12.2021.

Выход в свет 29.12.2021.

Формат 60 × 84 1/8. Тираж 2000 экз.

Бумага мелованная матовая.

Печать офсетная. Цена свободная.

Распространяется по подписке.

Отпечатано в типографии

Издательства МИСИ — МГСУ

129337, Москва, Ярославское ш., д. 26 корп. 8.

Фото для оформления журнала взято с сайта: www.pexels.com

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

Корольченко Д.А., к. т. н., академик МАНЭБ (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА:

Мольков В.В., д. т. н., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбери, Великобритания)

Стрижак П.А., д. ф.-м. н., профессор (Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Бакиров И.К., к. т. н. (Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия, Республика Башкортостан)

Барбин Н.М., д. т. н., к. х. н., профессор, почетный работник науки и техники РФ (Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург, Россия)

Берлин А.А., д. х. н., профессор, академик РАН (Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, Москва, Россия)

Богданова В.В., д. х. н., профессор (Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь)

Брушлинский Н.Н., д. т. н., профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

Бурханов А.И., д. ф.-м. н. (Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия)

Ватнер П., д. т. н. (Академия пожарной службы Берлина, Берлин, Германия)

Кузнецов С.В., д. ф.-м. н., профессор (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия)

Ложкин В.Н., д. т. н., профессор (Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России, Санкт-Петербург, Россия)

Малыгин И.Г., д. т. н., профессор (Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия)

Поландов Ю.Х., д. т. н., профессор (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)

Пузач С.В., д. т. н., профессор, член-корреспондент НАНПБ, заслуженный деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

Раимбеков К.Ж., к. ф.-м. н. (Кокшетауский технический институт Комитета по чрезвычайным ситуациям МВД Республики Казахстан, Кокшетау, Казахстан)

Рестас А. (Институт управления при ЧС Национального университета Государственной службы, Будапешт, Венгрия)

Роу Р.Л., профессор (Школа права Университета Джорджтаун, Вашингтон, США)

Серков Б.Б., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

Тамразян А.Г., д. т. н., профессор, действительный член Российской инженерной академии (РИА), советник РААСН (Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия)

Топольский Н.Г., д. т. н., профессор, академик РАЕН и НАНПБ, заслуженный деятель науки РФ (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

Холщевников В.В., д. т. н., профессор, академик и почетный член РАЕН, академик ВАНКБ, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации (Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Россия)

Христов Б., д. т. н., профессор (Берлинский институт техники и экономики, Берлин, Германия)

Челани А. (Миланский технический университет, Милан, Италия)

Чирик Р.М., д. т. н., профессор (Высшая техническая школа, Нови Сад, Сербия)

Шебеко Ю.Н., д. т. н., профессор, действительный член НАНПБ (ВНИИПО МЧС России, Балашиха Московской обл., Россия)

Шилдс Т. Дж., профессор (Ольстерский университет, Ньютаунбери, Великобритания)

Шоус Р. (Университет штата Пенсильвания, Университи-Парк, Пенсильвания, США)

Якуш С.Е., д. ф.-м. н. (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия)

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ

NEWS, CONFERENCES, EXHIBITIONS

УЧЕБНО-КОНСУЛЬТАЦИОННЫЙ СЕМИНАР
«Обоснование мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объектов капитального строительства путем разработки специальных технических условий, стандартов организации, расчетов и испытаний»

6

EDUCATIONAL AND CONSULTING SEMINAR
“Substantiation of measures to ensure fire safety of capital construction projects by developing special technical conditions, organization standards, calculations and tests”

ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА

COMBUSTION, DETONATION AND EXPLOSION PROCESSES

Н.Л. ПОЛЕТАЕВ
Взаимосвязь эмпирических закономерностей турбулентного горения аэрозвесей

7

N.L. POLETAEV
Relationship between empirical laws of turbulent combustion of dust/air mixtures

БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ

SAFETY OF SUBSTANCES AND MATERIALS

Н.И. КОНСТАНТИНОВА, Н.В. СМЕРНОВ, А.В. ЗУБАНЬ, О.П. ЗУБАНЬ
Пожаробезопасное применение акустических материалов в зданиях культурно-зрелищного назначения

13

N.I. KONSTANTINOVA, N.V. SMIRNOV, A.V. ZUBAN, O.P. ZUBAN
The fire-safe application of acoustic materials in cultural and entertainment buildings

Т.Ю. ЕРЕМИНА, О.В. СУШКОВА
Экспериментальное исследование пожароопасных характеристик материалов в помещениях зданий культурно-исторического наследия

24

T.Yu. EREMINA, O.V. SUSHKOVA
An experimental study on flammability characteristics of materials on the premises of buildings of cultural and historical heritage

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

MATHEMATICAL MODELING, NUMERICAL METHODS AND PROGRAM COMPLEXES

Н.Г. ТОПОЛЬСКИЙ, В.Я. ВИЛИСОВ, Р.Ш. ХАБИБУЛИН, Б.М. ПРАНОВ, Ф.В. ДЕМЕХИН
Применение машинообучаемых цепей Маркова для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития

39

N.G. TOPOLSKIY, V.Ya. VILISOV, R.Sh. KHABIBULIN, B.M. PRANOV, F.V. DEMEKHIN
Application of Markov chains to rank fires and forecast fire development phases

БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ

SAFETY OF TECHNOLOGICAL PROCESSES AND EQUIPMENT

В.П. НАЗАРОВ, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО, С.А. ШВЫРКОВ, М.М. ТАНГИЕВ, А.П. ПЕТРОВ
Особенности оценки уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров перед проведением огневых работ

52

V.P. NAZAROV, D.A. KOROLCHENKO, S.A. SHVYRKOV, M.M. TANGIEV, A.P. PETROV
Features of assessing the level of fire and explosion safety of tanks before hot works

БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ

SAFETY OF BUILDINGS, STRUCTURES, OBJECTS

С.В. ПУЗАЧ, Т.Ю. ЕРЕМИНА, Д.А. КОРОЛЬЧЕНКО
Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки
С.А. ШВЫРКОВ, Я.И. ЮРЬЕВ, А.П. ПЕТРОВ, В.П. НАЗАРОВ
Расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком группы мазутных резервуаров

61

73

S.V. PUZACH, T.Yu. EREMINA, D.A. KOROLCHENKO
The evaluation of actual fire resistance limits of steel structures exposed to real fire loading
S.A. SHVYRKOV, Ya.I. YURIEV, A.P. PETROV, V.P. NAZAROV
The analysis of the fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor as the protection for a group of fuel oil tanks

СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

STATISTICS AND SYSTEM ANALYSIS

Н.Н. БРУШЛИНСКИЙ, С.В. СОКОЛОВ, М.П. ГРИГОРЬЕВА
О пожарной безопасности в сельской местности России

87

N.N. BRUSLINSKIY, S.V. SOKOLOV, M.P. GRIGORIEVA
On fire safety in rural areas of Russia

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА

AUTOMATED SYSTEMS AND MEANS

И.Г. МАЛЫГИН, А.А. ТАРАНЦЕВ
Об обеспечении безопасного следования автомобиля экстренной службы в сложных дорожных условиях

97

I.G. MALYGIN, A.A. TARANTSEV
On ensuring the safe movement of emergency service vehicles under hazardous driving conditions

ВОПРОС – ОТВЕТ

QUESTION – ANSWER

А.С. ХАРЛАМЕНКОВ
Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1

108

A.S. KHARLAMENKOV
The fire hazard of large transition resistances. From theory to practice. Part 1

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2021 Г.

114

AUTHORS INDEX '2021

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2021 Г.

118

GUIDE INDEX OF THE ARTICLES PUBLISHED IN 2021

ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ ЖУРНАЛА – ознакомление международного сообщества с результатами исследований, проводимых российскими и зарубежными учеными в области комплексной безопасности.

THE MAIN AIM OF THE JOURNAL – acquaintance of the international community with results of the researches conducted by the Russian and foreign scientists in the field of integrated security.



Пожаробезопасное применение акустических материалов

Стр. 13



Оценка уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров

Стр. 52



Расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены

Стр. 73



Стр. 87

О пожарной безопасности в сельской местности России

Стр. 97



Безопасное следование автомобиля экстренной службы

КОМПЛЕКСНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

пожарная • промышленная • производственная • экологическая



FOUNDER and PUBLISHER —

Federal State Budgetary Educational
Institution of Higher Education Moscow
State University of Civil Engineering
(National Research University) (MGSU)

Address:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russian Federation

Journal founded in 1992,
issued 6 times per year.

Publication is registered by the Federal
Service for Supervision of Communications,
Information Technology, and Mass Media
of Russia. Registration certificate PI No.
FS 77-79402 on November 02, 2020.

DOI prefix: 10.22227.

EDITORIAL STAFF:

Executive editor **Dyadicheva A.A.**

Editor **Makhiyanova E.V.**

Russian-English translation **Yudenkova O.V.**

Corrector **Svetlichnaya L.V.**

Layout **Aleynikova A.G.**

Address of Editorial Staff:

26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
129337, Russia

Corresponding to: Post office box 26,
Moscow, 121352, Russian Federation.

Phone/Fax: +7 (495) 228-09-03,
+7 (909) 940-01-85.

E-mail: info@fire-smi.ru

https://www.fire-smi.ru

"Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion
Safety" is included in the List of periodical scientific
and technical publication, recommended by Higher
Attestation Commission of the Russian Federation
for publishing aspirants' works for candidate
and doctoral degree, in Abstracting Journal and
Database of VINITI RAS, EBSCO. Information
about the journal is annually published in "Ulrich's
Periodicals Directory". English version of "Fire and
Explosion Safety" articles is included in Chemical
Abstract Service (CAS).

No part of this publication may be used
or reproduced in any form or by any means without
the prior permission of the Publishers. Reproducing
any part of this material a reference to the journal
is obligatory.

Authors and advertisers account for contents
of given papers and for publishing in the open
press.

Opinion of Editorial Staff not always coincides with
Author's opinion.

Signed for printing 27.12.2021.

Date of publication 29.12.2021.

Format is 60 × 84 1/8.

Printing is 2000 copies.

Chalk-overlay mat paper.

Offset printing. Free price.

Journal sells subscription.

Printing house of the Publishing house
MISI – MGSU

building 8, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow,
Russian Federation, 129337.

EDITOR-IN-CHIEF:

D.A. Korolchenko, Cand. Sci. (Eng.), Academician of International Academy of Ecology
and Life Safety (National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow,
Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF:

V.V. Molkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern
Ireland, UK)

P.A. Strizhak, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (National Research Tomsk Polytechnic
University, Tomsk, Russia)

EDITORIAL BOARD:

I.K. Bakirov, Cand. Sci. (Eng.) (Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia,
Republic of Bashkortostan)

N.M. Barbin, Dr. Sci. (Eng.), Cand. Sci. (Chem.), Professor, Honoured Worker of Science
and Technology of the Russian Federation (Ural Institute of State Fire Service of Emercom
of Russia, Yekaterinburg, Russia)

A.A. Berlin, Dr. Sci. (Chem.), Professor, Academician of Russian Academy of Sciences (Se-
menov Institute of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

V.V. Bogdanova, Dr. Sci. (Chem.), Professor (Research Institute for Physical Chemical
Problems of Belarusian State University, Minsk, Belarus)

N.N. Brushlinskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural
Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation (State Fire Academy of Emercom of
Russia, Moscow, Russia)

A.I. Burkhanov, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (Volgograd State Technical University, Volgograd,
Russia)

P. Wagner, Dr. Sci. (Eng.) (Berlin Fire and Rescue Academy, Berlin, Germany)

S.V. Kuznetsov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor (A. Ishlinsky Institute for Problems in
Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)

V.N. Lozhkin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Saint Petersburg University of State Fire Service of
Emercom of Russia, Saint Petersburg, Russia)

I.G. Malygin, Dr. Sci. (Eng.), Professor (Solomenko Institute of Transport Problems of
the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia)

Yu.Kh. Polandov, Dr. Sci. (Eng.), Professor (National Research Moscow State University of
Civil Engineering, Moscow, Russia)

S.V. Puzach, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Corresponding Member of National Academy of
Fire Science (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

K.Zh. Raimbekov, Cand. Sci. (Phys.-Math.) (Kokshetau Technical Institute, Committee
of Emergency Situations of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Kazakhstan,
Kokshetau, Kazakhstan)

A. Restas, Ph. D. (National University of Public Service, Institute of Disaster Management,
Budapest, Hungary)

R.L. Roe, Professor (Georgetown University Law Center, Washington, United States)

B.B. Serkov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Science
(State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

A.G. Tamrazyan, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of Russian Academy of Engi-
neering, Advisor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (National
Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia)

N.G. Topolskiy, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sci-
ences, Academician of National Academy of Fire Science, Honoured Scientist of the Russian
Federation (State Fire Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

V.V. Kholshchevnikov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician and Honoured Member
of Russian Academy of Natural Sciences, Academician of World Academy of Sciences for
Complex Safety, Honoured Higher Education Employee of the Russian Federation (State Fire
Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia)

B. Hristov, Dr. Ing., Professor (University of Applied Sciences, Berlin, Germany)

A. Celani (Polytechnic University of Milan, Milan, Italy)

R.M. Ciric, Ph. D., Professor (The Higher Technical School of Professional Studies, Novi
Sad, Serbia)

Yu.N. Shebeko, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of National Academy of Fire Sci-
ence (All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, Balashikha,
Moscow Region, Russia)

T.J. Shields, Ph. D., Professor (Ulster University, Newtownabbey, Northern Ireland, UK)

R.C. Shouse, Ph. D. (Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, United
States)

S.E. Yakush, Dr. Sci. (Phys.-Math.) (A. Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of
the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia)



Поздравляем с юбилеем!

В декабре 2021 г. члену редакционной коллегии нашего журнала и постоянному автору, доктору технических наук Юрию Христофоровичу ПОЛАНДОВУ исполняется 80 лет!

Юрий Христофорович родился в семье учителей, блестяще закончил школу, дальнейшее образование получил в Харьковском авиационном институте и аспирантуре Московского авиационного института на двигательных факультетах. В науку наш коллега пришел после школы испытателей ракетных двигателей, — сначала в Научно-испытательном центре ракетно-космической промышленности (г. Пересвет), затем в НИИ проблем машиностроения при МВТУ им. Н.Э. Баумана (п. Орево).

После переезда в г. Орел Юрий Христофорович работал в ОрелГТУ, преподавал на кафедре высшей математики, в это время нашел себя в исследованиях взрывобезопасности оборудования и, используя опыт испытателя, на опытах переводил изучаемое оборудование в состояния, которые принято считать опасными. В советское время, выполняя исследования по заказу Госагропрома СССР, был награжден медалями ВВЦ, стал победителем Всероссийского конкурса работ по охране труда в 1985 г. и лауреатом Всесоюзного конкурса НИР по охране труда в 1986 г.

В настоящее время Юрий Христофорович со своими учениками — молодыми учеными и аспирантами — занят исследованиями в области газовых взрывов в сложных незамкнутых границах, успешно выполнив фундаментальные исследования по трем грантам РФФИ и пяти проектам в научных программах Минобрнауки России.

Кроме экспериментальных работ, Юрий Христофорович широко использует численные методы моделирования опасных ситуаций, является соавтором трех компьютерных программ серии «Вулкан» по симуляции газовых взрывов, зарегистрированных в Роспатенте. Он является членом Европейского сообщества по вычислительным методам в прикладных науках и инженерии (ECCOMAS) и постоянным членом Греческой ассоциации специалистов по вычислительной математике (GRACM), постоянно выступает на организуемых ими конгрессах и конференциях.

Юрий Христофорович — автор более 140 научных работ, подавляющая часть результатов его научных исследований опубликована в профильных ведущих российских и европейских журналах, а также представлена в виде докладов на конференциях. Он имеет 16 изобретений.

Последнее десятилетие Юрий Христофорович Поландов успешно работает в Институте комплексной безопасности в строительстве НИУ МГСУ, активно участвует в работе диссертационного совета. Он полон сил и планов.

От всей души желаем юбиляру крепкого здоровья и новых успехов в науке!



Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Центральный научно-исследовательский и проектный институт
Министерства строительства и жилищно-коммунального
хозяйства Российской Федерации»



**МИНСТРОЙ
РОССИИ**

119331, Москва, проспект Вернадского, д. 29; ОГРН 1027700245825; ИНН/КПП 7736115684/773601001
Тел.: +7 (499) 951-95-21; E-mail: info@cniipminstroy.ru; Сайт: www.cniipminstroy.ru

Учебно-консультационный семинар

«ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ КАПИТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА ПУТЕМ РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ, СТАНДАРТОВ ОРГАНИЗАЦИЙ, РАСЧЕТОВ И ИСПЫТАНИЙ»

25 марта 2022 года на территории World Trade Center Moscow, ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» проводит ежегодный семинар на тему «Обоснование мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объектов капитального строительства путем разработки специальных технических условий, стандартов организаций, расчетов и испытаний».

Программа семинара находится в процессе формирования. В прошлые годы с докладами на семинаре выступили представители Минстроя России, ФАУ ФЦС, Главгосэкспертизы, НИУ МГСУ, ДНПР МЧС России, ВНИИПО МЧС России, Академии ГПС МЧС России, НИЦ «Строительство» (ЦНИИСК, НИИЖБ), ЦНИИПромзданий, Стройнадзора, ТК 274, ТК 465 и др.

Оперативную информацию по программе семинара можно получить у модератора и на сайте ForumFire.ru

В рамках семинара планируется обсудить вопросы дублирующих нормативных требований, установленных сводами правил, обеспечивающими соблюдение разных технических регламентов и согласование специальных технических условий в МЧС России и Минстрое России, а также их пересечение с ФНиП в части промышленных объектов, вопросы расчета огнестойкости строительных конструкций, расчетов пожарного риска и других расчетов по вопросам пожарной безопасности в строительстве.

По итогам семинара слушатели получают удостоверение о повышении квалификации установленного образца (Лицензия Федеральной службы по надзору в сфере образования и науки № 2060 от 4 апреля 2016 г.).

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ:

Модератор семинара:

**Пронин
Денис
Геннадиевич**

заместитель директора департамента градостроительного и технического нормирования,
d.pronin@cniipminstroy.ru,
+7 (499) 951-95-21;
+7 (926) 141-56-56.

Оргкомитет:

**Полонкочева
Людмила
Магомедовна**

руководитель Центра дополнительного профессионального образования и координации обучения,
L.polonkoeva@cniipminstroy.ru,
+7 (499) 951-95-21 доб. 140,
+7 (926) 460-63-88.

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



Взаимосвязь эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей

Николай Львович Полетаев ✉

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен массив известных экспериментальных данных, полученных преимущественно в стандартной камере объемом 1 м³. Это позволило представить характер трех зависимостей турбулентного горения аэровзвесей: зависимости минимального взрывоопасного содержания кислорода (МВСК) и индекса взрывоопасности K_{st} от энергии источника зажигания E_{ig} (в логарифмическом масштабе) и зависимость K_{st} от начального содержания кислорода в воздухе C_{ox} .

Эмпирические зависимости. Анализ показал, что все рассматриваемые зависимости с относительной точностью около 20 % могут быть представлены в виде линейных функций аргумента, изменяющегося в следующих пределах: E_{ig} изменяется от минимальной энергии зажигания E_{min} до 10 кДж; C_{ox} изменяется от МВСК до 21 % об. По характеру зависимости K_{st} от E_{ig} все пыли делятся на два вида. Для пыли первого вида K_{st} не зависит от E_{ig} , для пыли второго вида $K_{st} \propto (E_{ig} - E_{min})$.

Взаимосвязь эмпирических зависимостей. Показано, что рассмотренные эмпирические зависимости должны быть взаимосвязаны для пыли второго рода, а именно, наклоны C_n ($n = 1, 2$ и 3 — номер зависимости) линейных функций, аппроксимирующих данные зависимости для конкретного образца пыли, удовлетворяют соотношению: $C_2(21\% \text{ об.}) = -C_1C_3(10 \text{ кДж})$. Из-за отсутствия образца пыли, для которого имеются данные по всем трем зависимостям, полученное соотношение подтвердили для средних значений параметров: $\langle C_2(21\% \text{ об.}) \rangle = -\langle C_1 \rangle \cdot \langle C_3(10 \text{ кДж}) \rangle$.

Обсуждение результата. Удовлетворительная точность выполнения соотношения между C_1 , C_2 и C_3 порождает уверенность в объективности и взаимосвязи рассматриваемых эмпирических зависимостей турбулентного горения аэровзвесей.

Выводы. Показано, что рассмотренные эмпирические зависимости турбулентного горения аэровзвесей в камере объемом 1 м³ взаимосвязаны, и установлен вид этой связи.

Ключевые слова: пылевой взрыв; камера объемом 1 м³; минимальное взрывоопасное содержание кислорода; индекс взрывоопасности; энергия зажигания

Для цитирования: Полетаев Н.Л. Взаимосвязь эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 7–12. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.7-12

✉ Полетаев Николай Львович, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Relationship between empirical laws of turbulent combustion of dust/air mixtures

Nikolay L. Poletaev ✉

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An array of known experimental data, mainly obtained in a standard 1 m³ chamber, is considered in the article. It allowed to identify the nature of three dependences of the turbulent combustion of dust, including the dependences of limited oxygen concentration (LOC) and explosive index K_{st} on the energy of ignition source E_{ig} (on a logarithmic scale) and the dependence of K_{st} on the initial oxygen content in the air C_{ox} .

Empirical dependencies. The analysis showed that all considered dependences, having a relative accuracy of about 20 % can be represented as linear functions of an argument varying within the following limits: E_{ig} varies from minimum ignition energy E_{min} to 10 kJ; C_{ox} ranges from LOC to 21 % vol. According to the nature of dependence of K_{st} on E_{ig} , all dusts are divided into two types. For the first type of dust, K_{st} does not depend on E_{ig} . For the dust of the second type, $K_{st} \propto (E_{ig} - E_{min})$.

Relationship of empirical dependencies. It is shown that the considered empirical dependencies should be interrelated for the dust of the second kind. Namely, slopes C_n ($n = 1, 2$ or 3 as the number of the dependence) of linear functions, approximating the empirical dependencies for a particular dust sample, satisfy the relationship: $C_2(21 \text{ vol. \%}) = -C_1 \cdot C_3(10 \text{ kJ})$. Due to the absence of a dust sample, for which data on all three dependencies are available, the obtained relationship was confirmed for the average values of parameters: $\langle C_2(21 \text{ vol. \%}) \rangle = -\langle C_1 \rangle \cdot \langle C_3(10 \text{ kJ}) \rangle$.

Discussion of the result. The satisfactory accuracy of the relationship between C_1 , C_2 и C_3 gives rise to the confidence in the objectivity and relationship of the considered empirical dependencies of the turbulent combustion of dust.

Conclusions. It is shown that the considered empirical dependencies of the turbulent combustion of dust in a 1 m^3 chamber are interrelated and the form of this relationship is identified.

Keywords: dust explosion; 1 m^3 chamber; limiting oxygen concentration; explosion index; ignition energy

For citation: Poletaev N.L. Relationship between empirical laws of turbulent combustion of dust/air mixtures. *Pozharovzrybobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):7-12. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.7-12 (rus).

✉ Nikolay Lvovich Poletaev, e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Введение

Турбулентное горение аэрозвеси в камерах стандартного тестирования объемом 20 л или 1 м^3 ^{1,2} представляет весьма сложный процесс, для особенностей которого можно предложить эмпирические закономерности, но не всегда удастся найти объяснение даже на качественном уровне [1, 2]. В частности, не получило объяснения существование дисперсных материалов, для которых в камере объемом 1 м^3 наблюдается ненасыщающееся линейное снижение минимального взрывоопасного содержания кислорода (LOC, от англ. limiting oxygen concentration) с ростом энергии источника зажигания E_{ig} в логарифмическом масштабе $\varepsilon_{ig} = \log_{10}(E_{ig})$ [3]. Отсутствует объяснение возможности разделения всех пылей на два типа в зависимости от отсутствия (1-й тип) или наличия (2-й тип) сильной зависимости индекса взрывоопасности K_{st} от ε_{ig} [4]. Нет объяснения линейной зависимости K_{st} от начального содержания кислорода C_{ox} в воздухе камеры, разбавленном инертным газом [2].

Доходчивое объяснение упомянутых особенностей представляется весьма трудной задачей, решение которой целесообразно разбить на несколько этапов, к начальному из которых относится настоящая работа. Хотя перечисленные выше особенности касаются различных аспектов турбулентного горения аэрозвесей, здесь предпринята попытка обнаружить количественную связь между параметрами эмпирических описаний этих особенностей на основе известных экспериментальных данных. Поскольку результаты исследований в камере объемом 1 м^3 считаются более надежными [5–11], именно такие результаты будут использованы в первую очередь при построении эмпирических закономерностей турбулентного горения аэрозвесей.

¹ EN 14034-3:2006+A1:2011 Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 3: Determination of the lower explosion limit LEL of dust clouds.

² ASTM E1226-19. Standard Method Explosibility Dust Clouds. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019:1-15.

1. Эмпирические зависимости

1.1 Зависимость $\text{LOC}(E_{ig})$

Примеры зависимости $\text{LOC}(E_{ig})$ для некоторых дисперсных материалов приводятся на рис. 1 [3]. Существенной особенностью графиков на рис. 1 является линейное снижение LOC с увеличением ε_{ig} во всем диапазоне значений $E_{ig} > E_{\min}$:

$$\text{LOC}(E_{ig}) = 21 + C_1[\varepsilon_{ig} - \varepsilon_{\min}(21 \text{ \%})], \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\min}(21 \text{ \%}) = \log_{10}[E_{\min}(21 \text{ \%})]$;

$C_1 < 0$ — коэффициент, постоянный для каждого конкретного образца пыли, % об.;

$E_{\min}(C_{ox})$ — минимальная энергия зажигания аэрозвеси, в общем случае, зависящая от C_{ox} , Дж.

$E_{\min}(21 \text{ \%})$ совпадает с тем значением E_{ig} , которое на графике рассматриваемой зависимости соответствует $\text{LOC} = 21 \text{ \% об.}$

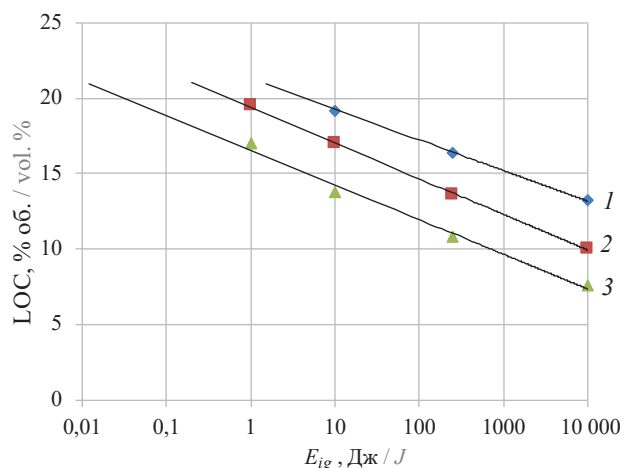


Рис. 1. Зависимость минимального взрывоопасного содержания кислорода в воздухе аэрозвеси LOC от энергии источника зажигания E_{ig} (Дж). Цветные символы — данные эксперимента в камере объемом 1 м^3 ; отрезки прямой — аппроксимации зависимостей соотношением (1); 1 — гороховая мука; 2 — ацетат целлюлозы; 3 — параформальдегид [3]

Fig. 1. Dependence of limited oxygen concentration LOC on the energy of ignition source E_{ig} (J). Symbols — experimental data (1 m^3 chamber); line segments — approximations of dependences (1); 1 — pea flour; 2 — cellulose acetate; 3 — paraformaldehyde [5]

Значения C_1 для всех трех исследованных пылей близки, что позволяет с относительной точностью $\pm 5\%$ сделать следующую оценку усредненно-го значения коэффициента $\langle C_1 \rangle \approx -2,33\%$ об.

1.2. Зависимость $K_{st}(C_{ox}, E_{ig})$

Ниже приводятся результаты раздельного исследования зависимости $K_{st}(C_{ox}, E_{ig})$ от одной из переменных при постоянстве (21 % об. и 10 кДж соответственно) другой.

1.2.1. Зависимость $K_{st}(21\%, E_{ig})$

Экспериментальными исследованиями установлено существование двух типов пыли с принципиально разными зависимостями $K_{st}(21\%, E_{ig})$ [4].

Для пыли 1-го типа K_{st} слабо зависит от E_{ig} в диапазоне $E_{ig} > E_{min}$ (рис. 2). Как правило, для такой пыли $E_{min} < 1$ Дж [4].

Для пыли 2-го типа K_{st} приблизительно пропорционален $(\varepsilon_{ig} - \varepsilon_{min})$ в диапазоне $10 \text{ кДж} > E_{ig} > E_{min}$. Примеры графиков такой зависимости для взвесей трех пылей в воздухе нормального начального (до воспламенения аэрозвеси) состава приводятся на рис. 3. Как правило, для такой пыли $E_{min} > 1$ Дж [6]. Величина E_{min} отвечает точке отрыва графика от оси E_{ig} на рис. 3.

$$K_{st}(C_{ox}, 10 \text{ кДж}) = \begin{cases} C_3(10 \text{ кДж})[C_{ox} - \text{LOC}(10 \text{ кДж})], & \text{если } C_{ox} > \text{LOC}, \\ 0, & \text{если } C_{ox} \leq \text{LOC}, \end{cases} \quad (3)$$

где C_3 и LOC — параметры, в общем случае зависящие от E_{ig} и выбора конкретного образца пыли;

$C_3(10 \text{ кДж})$, МПа·м/с (% об.), и LOC (10 кДж), % об., отвечают $E_{ig} = 10 \text{ кДж}$.

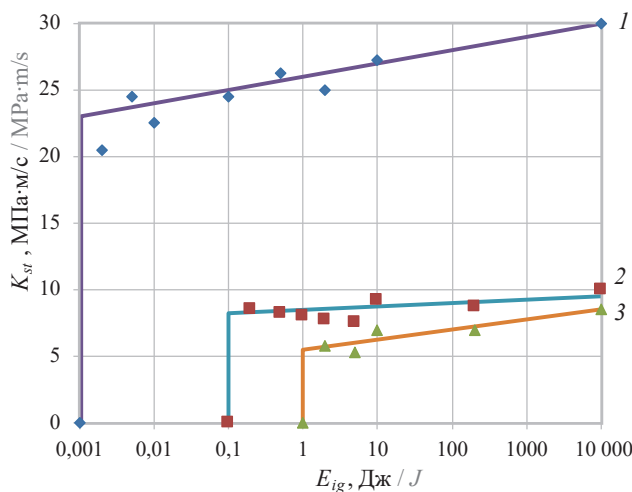


Рис. 2. Зависимость индекса взрыва K_{st} от энергии источника зажигания E_{ig} для 1-го типа пыли: цветные символы — экспериментальные данные ($C_{ox} = 21\%$ об.); отрезки ломаной прямой — аппроксимация зависимости; 1 — антиоксидант; 2 — гороховая мука; 3 — краситель [4]

Fig. 2. Dependence of explosion index K_{st} on the energy of ignition source E_{ig} for the 1st type of dust. Symbols — experimental data ($C_{ox} = 21\%$ vol.); broken line segments — dependence approximation. 1 — antioxidant; 2 — pea flour, 3 — dye [6]

Поскольку эксперименты проводились при единственном значении $C_{ox} = 21\%$ об., графики на рис. 3 аппроксимируются соотношением

$$K_{st}(21\%, E_{ig}) = \begin{cases} C_2(21\%)(\varepsilon_{ig} - \varepsilon_{min}), & \text{если } \varepsilon_{ig} > \varepsilon_{min}, \\ 0, & \text{если } \varepsilon_{ig} < \varepsilon_{min}, \end{cases} \quad (2)$$

где C_2 — коэффициент, в общем случае зависящий от C_{ox} ;

$C_2(21\%)$ является постоянным для каждого конкретного образца пыли, МПа·м/с.

Для трех образцов пыли, представленных на рис. 3, значения $C_2(21\%)$ составляют соответственно 4, 5,4 и 7,5 МПа·м/с, что позволяет с относительной точностью $\pm 30\%$ сделать следующую оценку усредненного значения коэффициента: $\langle C_2(21\%) \rangle \approx 5,6$ МПа·м/с.

1.2.2. Зависимость $K_{st}(C_{ox}, 10 \text{ кДж})$

Зависимость $K_{st}(C_{ox}, 10 \text{ кДж})$ иллюстрируется графиками (рис. 4), заимствованными из [1, 12, 13], и описывается известным эмпирическим соотношением [2]:

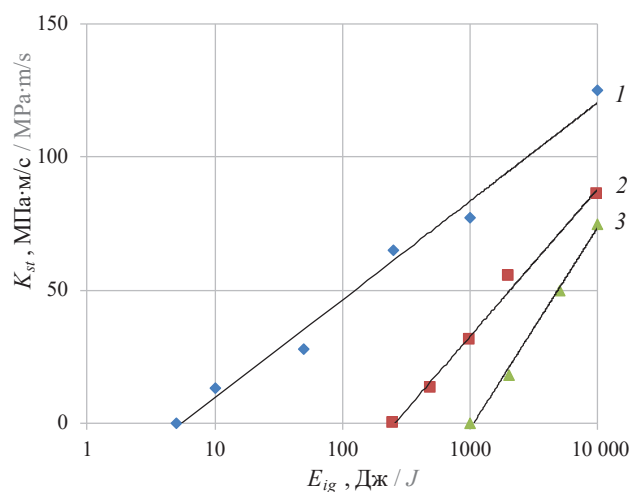


Рис. 3. Зависимость индекса взрыва K_{st} от энергии источника зажигания E_{ig} для 2-го типа пыли: цветные символы — экспериментальные данные ($C_{ox} = 21\%$ об.); отрезок прямой — аппроксимация зависимости соотношением (2); 1 — пигмент; 2, 3 — красители [4]

Fig. 3. Dependence of the explosion index K_{st} on the energy of the ignition source E_{ig} for the 2nd type of dust. Symbols — experimental data ($C_{ox} = 21\%$ vol.); segment of a straight line — approximation of dependence by relation (2); 1 — pigment; 2, 3 — dyes [4]

Для восьми образцов пыли, представленных на рис. 4, значения C_3 относятся к диапазону от 1 МПа·м/с·(% об.) до 3 МПа·м/с·(% об.). С относительной точностью $\pm 50\%$ сделать следующую оценку усредненного значения коэффициента $\langle C_3(10 \text{ кДж}) \rangle \approx 2 \text{ МПа·м/с·(% об.)}$.

Взаимосвязь эмпирических зависимостей

Эмпирические зависимости (1)–(3), построенные для случая конкретной пыли 2-го типа, являются взаимосвязанными. Несложно показать, что входящие в (1)–(3) коэффициенты связаны соотношением

$$C_2(21\%) = -C_1 C_3(10 \text{ кДж}). \quad (4)$$

Отсутствие совпадений в перечнях образцов пыли, использованных при построении графиков на рис. 1–3, не позволяет напрямую проверить справедливость (4). Для проверки (4) на качественном уровне воспользуемся усредненными значениями упомянутых коэффициентов. Пренебрегая корреляцией между значениями C_1 и C_3 для различных пылей, получим соотношение для усредненных значений коэффициентов, аналогичное соотношению (4):

$$\langle C_2(21\%) \rangle = -\langle C_1 \rangle \cdot \langle C_3(10 \text{ кДж}) \rangle. \quad (5)$$

Подставляя в (5) усредненные значения коэффициентов, несложно убедиться в выполнении этого соотношения с относительной точностью около 20 % ($5,6 \approx 2,33 \cdot 2$).

Обсуждение результата

Удовлетворительная точность выполнения (5) порождает уверенность в объективности и взаимосвязи рассматриваемых эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей.

Необходимость в такой уверенности связана, в первую очередь, с данными, представленными на рис. 1. Согласно рис. 1 линейная зависимость $\text{LOC}(\varepsilon_{ig})$ не насыщается при $E_{ig} = 10 \text{ кДж}$. Это означает, что представленные на рис. 1 данные вызывают сомнение в возможности определить реальное значение LOC для пыли 2-го типа в камере объемом 1 м³ и, следовательно, нуждаются в проверке. Дополнительно удивляет линейность $\text{LOC}(\varepsilon_{ig})$ во всем диапазоне значений ε_{ig} , поскольку использовались источники зажигания с различной эффективностью использования запасенной энергии [14]: для энергий, не превышающих 100 Дж, — конденсированный разряд, а в остальных случаях — факел горящего пиротехнического заряда.

Кроме того, данные исследований в камере объемом 1 м³ (см. табл. 1–9 в [1]) не согласуются с утверждением о границе $E_{\min} \approx 1 \text{ Дж}$, разделяющей пыли двух видов.

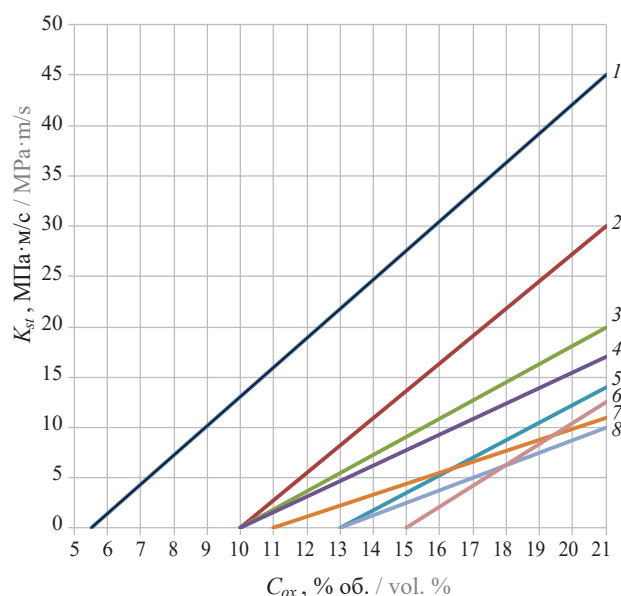


Рис. 4. Примеры сглаженных зависимостей индекса взрывоопасности K_{st} от содержания кислорода C_{ox} в воздухе, разбавленном азотом: 1 — алюминий [1]; 2 — пероксид А [1]; 3 — метилцеллюлоза [1]; 4 — пероксид В [1]; 5 — немецкий лигнит [13]; 6 — испанский лигнит [13]; 7 — бурый уголь [12]; 8 — стеарат бария [1]

Fig. 4. Examples of smoothed dependences of explosion hazard index K_{st} on oxygen content C_{ox} in the air diluted with nitrogen: 1 — aluminum [3]; 2 — peroxide A [3]; 3 — methylcellulose [3]; 4 — peroxide B [3]; 5 — German lignite [15]; 6 — Spanish lignite [15]; 7 — brown coal [14]; 8 — barium stearate [3]

Разумно полагать, что среди пылей с пониженной взрывоопасностью, которым в последние годы уделяется повышенное внимание [15–18], значительную долю будут составлять пыли 2-го вида.

Выводы

Рассмотрены известные экспериментальные данные о зависимости минимального взрывоопасного содержания кислорода в аэровзвеси от энергии зажигания и зависимости индекса взрывоопасности аэровзвесей от энергии зажигания и содержания кислорода в воздухе. Для каждой из трех зависимостей предложена эмпирическая линейная аппроксимация.

Показано, что для пыли, индекс взрывоопасности которой зависит от энергии источника зажигания, параметры аппроксимации всех трех зависимостей должны быть связаны определенным соотношением. Выполнение данного соотношения с удовлетворительной точностью подтверждается анализом использованных экспериментальных данных.

Удовлетворительная точность выполнения упомянутого соотношения порождает уверенность в объективности и взаимосвязи рассматриваемых эмпирических закономерностей турбулентного горения аэровзвесей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bartknecht W. *Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980. 259 s.
2. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries* 3rd edition. Boston : Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003. 720 p.
3. Siwek R., Cesana Ch. Ignition behavior of Dusts: Meaning and interpretation // *Process Safety Progress*. 1995. Vol. 14. Issue 2. Pp. 107–119. DOI: 10.1002/PRS.680140205
4. Cesana C., Siwek R. *Operating instructions 20-l-apparatus*. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden, 2009.
5. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion // *Powder technology*. 2019. Vol. 342. Pp. 204–213. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
6. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. Effect of turbulence spatial distribution on the deflagration index: Comparison between 20 L and 1 m³ // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021. Vol. 71. P. 104484. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104484
7. Medina C.H., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E., Gibbs B.M. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment // *Fuel*. 2015. Vol. 151. Pp. 91–101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
8. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. Systematic comparison and analysis of the discrepancies // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007. Vol. 20. Pp. 599–606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
9. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels // *Process Safety Progress*. 2021. Vol. 40. No. 4. Pp. 289–295. DOI: 10.1002/prs.12249
10. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. Vol. 49. Pp. 348–356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
11. Полетаев Н.Л. О проблеме экспериментального обоснования низкой взрывоопасности горючей пыли в 20-литровой камере // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 6. С. 5–20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20
12. Wiemann W. Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air/inert gas mixture. *Industrial Dust Explosions*, ASTM STP 958, Kenneth L. Cashdollar and Martin Hertzberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987. Pp. 33–44.
13. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R. *et al.* Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures // VTT Technical Research Centre of Finland. ESPOO 1999 Publications 394. 125 p. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>
14. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences // *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1986. Pp. 303–313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
15. Полетаев Н.Л. О взрывоопасности взрывов меламина // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 9. С. 15–28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28
16. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J.E.M. Metal dusts explosion hazards and protection // *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 77. Pp. 7–12. DOI: 10.3303/CET1977002
17. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C., Amyotte P.R. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1 m³ chambers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
18. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-L and 1 m³ test chambers // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019. Vol. 62. P. 103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937

REFERENCES

1. Bartknecht W. *Explosionen, Ablauf und Schutzmaßnahmen*. Berlin, Springer-Verlag, 1980; 259. (ger).
2. Eckhoff R.K. *Dust explosions in the process industries*. 3rd ed. Boston, Gulf Professional Publishing/Elsevier, 2003; 720.
3. Siwek R., Cesana Ch. Ignition behavior of Dusts: Meaning and Interpretation. *Process Safety Progress*. 1995; 14(2):107-119. DOI: 10.1002/PRS.680140205
4. Cesana C., Siwek R. *Operating Instructions 20-l-Apparatus*. Ver. 7.0, Kühner AG, Birsfelden, 2009.

5. Bagaria P., Li Q., Dastidar A., Mashuga C. Classification of particle breakage due to dust dispersion. *Powder technology*. 2019; 342:204-213. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.09.089
6. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. Effect of turbulence spatial distribution on the deflagration index: Comparison between 20 L and 1 m³. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2021; 71:104484. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104484
7. Medina C.H., MacCoitir B., Sattar H., Slatter D.J.F., Phylaktou H.N., Andrews G.E., Gibbs B.M. Comparison of the explosion characteristics and flame speeds of pulverised coals and biomass in the ISO standard 1 m³ dust explosion equipment. *Fuel*. 2015; 151:91-101. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.01.009
8. Proust Ch., Accorsi A., Dupont L. Measuring the violence of dust explosions with the “20 l sphere” and with the standard “ISO 1 m³ vessel”. *Systematic comparison and analysis of the discrepancies/Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2007; 20:599-606. DOI: 10.1016/j.jlp.2007.04.032
9. Portarapillo M., Sanchirico R., Di Benedetto A. On the pyrotechnic ignitors role in dust explosion testing: Comparison between 20 L and 1 m³ explosion vessels. *Process Safety Progress*. 2021; 40(4):289-295. DOI: 10.1002/prs.12249
10. Taveau J.R., Going J.E., Hochgreb S., Lemkowitz S.M., Roekaerts D.J.E.M. Igniter-induced hybrids in the 20-l sphere. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017; 49:348-356. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.07.014
11. Poletaev N.L. On the problem of experimental justification of low explosibility for dust/air mixture in the 20-l chamber. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(6):5-20. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.06.5-20 (rus).
12. Wiemann W. Influence of temperature and pressure on the explosion characteristics of dust/air/inert gas mixture. *Industrial Dust Explosions*, ASTM STP 958, Kenneth L. Cashdollar and Martin Hertzberg, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1987; 33-44.
13. Wilén C., Moilanen A., Rautalin A., Torrent J., Conde E., Lödel R. et al. Safe handling of renewable fuels and fuel mixtures. *VTT Technical Research Centre of Finland*. ESPOO 1999 Publications 394; 125. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/1999/P394.pdf>
14. Hertzberg M., Cashdollar K.L., Zlochower I. Flammability limit measurements for dusts and gases: Ignition energy requirements and pressure dependences. *Twenty-first Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute*. 1986; 303-313. DOI: 10.1016/S0082-0784(88)80258-3
15. Poletaev N.L. On explosibility of melamine dust/air mixture. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(9):15-28. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.09.15-28 (rus).
16. Taveau J.R., Lemkowitz S.M., Hochgreb S., Roekaerts D.J.E.M. Metal dusts explosion hazards and protection. *Chemical Engineering Transactions*. 2019; 77:7-12. DOI: 10.3303/CET1977002
17. Clouthier M.P., Taveau J.R., Dastidar A.G., Morrison L.S., Zalosh R.G., Ripley R.C., Amyotte P.R. Iron and aluminum powder explosibility in 20-L and 1 m³ chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103927. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103927
18. Addo A., Dastidar A.G., Taveau J.R., Morrison L.S., Khan F.I., Amyotte P.R. Niacin, lycopodium and polyethylene powder explosibility in 20-L and 1 m³ test chambers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2019; 62:103937. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.103937

Поступила 30.08.2021, после доработки 13.09.2021;

принята к публикации 04.10.2021

Received August 30, 2021; Received in revised form September 13, 2021;

Accepted October 4, 2021

Информация об авторе

ПОЛЕТАЕВ Николай Львович, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

Information about the author

Nikolay L. POLETAEV, Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC:1093620; ORCID: 0000-0003-2586-8597; e-mail: nlpvniipo@mail.ru

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 13–23
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):13-23

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК: 614.841.22

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.13-23>

Пожаробезопасное применение акустических материалов в зданиях культурно-зрелищного назначения

Наталья Ивановна Константинова✉, Николай Васильевич Смирнов,
 Андрей Владимирович Зубань, Ольга Петровна Зубань

Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны
 Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
 и ликвидации последствий стихийных бедствий, Московская обл., г. Балашиха, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В театральных и концертных залах создание акустической среды достигается, в том числе, за счет применения панелей для стен и потолков со специальными свойствами звукопоглощения. Однако современные материалы с необходимым уровнем акустических свойств зачастую не обеспечивают их соответствие существующим требованиям нормативных документов по пожарной безопасности.

Проблематика вопроса. К наиболее эффективным по звукопоглощению и с широкой возможностью обеспечения высококачественного дизайнерского оформления зрительных залов относятся современные акустические панели на основе минеральных волокон.

Несмотря на негорючую основу, высокие акустические свойства таких декоративных изделий обеспечиваются дополнительным использованием комплекса материалов различного химического состава, строения и физико-механических свойств, которые в совокупности несколько снижают их пожарную безопасность.

Из-за отсутствия требований пожарной безопасности, предъявляемых к специальным материалам, выполняющим функции звукопоглощения, возможность их применения в зрительных залах зданий и сооружений подтверждается, как правило, соответствием требованиям к традиционным декоративно-отделочным материалам. Вместе с тем, применение высокоэффективных акустических материалов затрудняется достаточно жесткими требованиями пожарной безопасности к декоративно-отделочным материалам стен и потолков. Целью настоящей работы являлось проведение аналитических исследований по существующему нормативному обеспечению пожаробезопасного применения акустических материалов, выполнение сравнительных экспериментальных исследований по оценке их пожарно-технических характеристик для установления возможности разработки предложений по совершенствованию их допустимого использования в помещениях и залах культурно-зрелищных объектов.

Результаты и их обсуждение. На основе аналитических исследований установлены наиболее эффективные звукопоглощающие отделочные материалы пониженной пожарной опасности — минераловатные изделия из стекловолокна или каменной ваты. Проведены сравнительные экспериментальные исследования комплекса показателей пожарной опасности акустических декоративных материалов на основе минеральных волокон с целью возможной их регламентации для пожаробезопасного применения в общественных зрительных залах.

Выявлена целесообразность установления требований к акустическим материалам для стен и потолков в качестве изменений в действующие нормативно-технические документы по пожарной безопасности.

Выводы. Разработаны предложения по внесению изменений в действующие нормативно-технические документы по пожарной безопасности, в частности, сформулированы отдельные требования к акустическим материалам для стен и потолков зальных помещений.

Ключевые слова: звукоизоляция; звукопоглощение; минераловолокнистые материалы; декоративно-отделочные материалы; показатели пожарной опасности

Для цитирования: Константинова Н.И., Смирнов Н.В., Зубань А.В., Зубань О.П. Пожаробезопасное применение акустических материалов в зданиях культурно-зрелищного назначения // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 13–23. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.13-23

✉ Константинова Наталья Ивановна, e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

The fire-safe application of acoustic materials in cultural and entertainment buildings

Nataliya I. Konstantinova✉, Nikolay V. Smirnov, Andrey V. Zuban, Olga P. Zuban

All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. In theatre and concert halls, acoustic environments are created, among other things, by wall and ceiling panels, that have special sound absorption properties. However, modern materials demonstrating the required acoustic properties do not necessarily comply with effective fire safety regulations.

Aims and purposes. Modern acoustic panels, made of mineral fibers, are among the most effective ones in terms of sound absorption; they also provide wide opportunities for the high-quality design of auditoriums.

Despite the non-combustible basic component, high acoustic performance of such decorative items is attained thanks to a set of supplementary materials that have different chemical compositions, structures, physical and mechanical properties, which, in the aggregate, slightly reduce fire safety.

Due to the lack of fire safety requirements applicable to special materials that perform the function of sound absorption, their usability in auditoriums of buildings and structures is confirmed, as a rule, according to the standards that apply to traditional decorative and finishing materials. At the same time, the use of high-performance acoustic materials is problematic due to rather strict fire safety requirements for decorative and finishing materials designated for walls and ceilings.

The purpose of this work is to conduct analytical studies on the effective regulatory framework of the fire-safe use of acoustic materials, perform comparative experimental studies on the assessment of their fire-technical characteristics to study the feasibility of drafting proposals on their acceptable use on the premises and in the halls of cultural and entertainment facilities.

Results and discussion. Analytical studies were conducted to identify the most effective sound-absorbing finishing materials that feature lower fire hazards. They are mineral wool products made of glass fiber or stone wool.

A set of fire hazard indicators, typical for acoustic decorative materials, made of mineral fibers, were subject to comparative experimental studies for the purpose of their legitimate fire-safe use in public auditoriums.

The co-authors found that the requirements, applicable to acoustic materials designated for walls and ceilings, can be issued as amendments to effective regulatory and technical documents on fire safety.

Conclusions. The co-authors proposed amendments to effective fire safety regulations in respect of the requirements applicable to acoustic materials designated for walls and ceilings of auditoriums.

Keywords: sound insulation; sound absorption; mineral fiber materials; decorative and finishing materials; fire hazard indicators

For citation: Konstantinova N.I., Smirnov N.V., Zuban A.V., Zuban O.P. The fire-safe application of acoustic materials in cultural and entertainment buildings. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):13-23. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.13-23 (rus).

✉ Nataliya Ivanovna Konstantinova, e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

Введение

При проектировании, строительстве и реконструкции культурно-зрелищных объектов, к числу которых относятся театры и концертные залы, повышенное внимание уделяется вопросам звуко- и виброизоляции, а также необходимости создания определенной акустической среды. Акустическая среда и хороший звук как основные функциональные составляющие в зрительных или репетиционных залах, обеспечиваются в том числе использованием конструкций с материалами, способными уменьшать энергию звуковых волн и снижать уровень громкости внутреннего или внешнего звука.

Согласно ГОСТ 23499–2009¹, существует специальная классификация строительных акустических материалов и изделий по множеству признаков, одним из которых является класс звукопоглощения, учитывающийся при установлении конкретных требований к параметрам акустической среды залов и помещений в зависимости от основного функционального назначения (например, залы оперных, драматических театров, многофункциональные залы и т.п.).

¹ ГОСТ 23499–2009. Материалы и изделия звукоизоляционные и звукопоглощающие строительные. Общие технические условия: принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (протокол № 36 от 21 октября 2009 г.).

Эффективность звукоизолирующих свойств основывается на возможности отражения звуковых волн от поверхности изделия, поглощении им звуковых волн и гашении ударного или воздушного шума за счет деформации элементов конструкции и материалов, из которых оно изготовлено. В современных дизайнерских проектах театральных и концертных залов отражение и рассеивание звука обычно происходит за счет применения специальных декоративно-отделочных панелей стен и потолков, расположенных согласно акустическому проекту помещения.

Проблематика вопроса

Требования пожарной безопасности, изложенные в ст. 134 и табл. 28, 29 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (в ред. Федеральных законов от 10 июля 2012 г. № 117-ФЗ и от 2 июля 2013 г. № 185-ФЗ)² (далее — ФЗ), распространяются на традиционные декоративно-отделочные, облицовочные материалы и покрытия полов на путях

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ : Федеральный закон принят Государственной Думой 4 июля 2008 г.; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

эвакуации и в зальных помещениях. Акустические материалы являются специальными материалами, выполняющими звукопоглощающие и звукоизоляционные функции, и требования пожарной безопасности к ним в ФЗ напрямую не установлены.

Тем не менее при решении вопросов обязательного подтверждения соответствия требованиям пожарной безопасности и возможности применения требуемых по акустическим параметрам материалов для залов могут использоваться общие положения ФЗ № 123 (табл. 28, 29) относительно декоративно-отделочных и облицовочных материалов на соответствие показателей пожарной опасности с учетом функциональной пожарной опасности зданий (помещений), вместимости зальных помещений.

Согласно обязательным требованиям, изложенным в ФЗ (табл. 29), в зданиях функциональной пожарной опасности Ф 1.2; Ф 2.3; Ф 2.4; Ф 3.1; Ф 3.2; Ф 3.6; Ф 4.2; Ф 4.3; Ф 4.4; Ф 5.1 допускаются к применению в качестве декоративно-отделочных и облицовочных материалов для стен и потолков материалы группы горючести НГ (негорючие) при вместимости зального помещения более 800 человек; Г1, В1, Д2, Т2 — при вместимости более 300, но не более 800 человек; класса КМ2 — при вместимости более 50, но не более 300 человек; не выше Г2, В2, Д3, Т2 — при вместимости не более 50 человек. В зданиях функциональной пожарной опасности Ф 1.1; Ф 2.1; Ф 2.2; Ф 3.3; Ф 3.4; Ф 3.5; Ф 4.1 допускаются к применению в качестве декоративно-отделочных и облицовочных материалов для стен и потолков материалы группы горючести НГ при вместимости зального помещения более 300 человек; не выше Г1, В1, Д2, Т2 — при вместимости более 15, но не более 300 человек; не выше Г2, В2, Д3, Т2 — при вместимости не более 15 человек.

Вместе с тем, согласно положениям СП 309.1325800.2017 «Здания театрально-зрелищные. Правила проектирования»³ для устройства в панелях для стен и потолков зрительных залов предусмотрено применение материалов со специальными акустическими свойствами не выше Г1, В1, Д2, Т2.

Тем не менее при решении вопросов обязательного подтверждения соответствия требованиям пожарной безопасности и возможности применения требуемых по акустическим параметрам материалов для залов могут использоваться общие положения ФЗ № 123 (табл. 28, 29) относительно декоративно-отделочных и облицовочных материалов на со-

ответствие показателей пожарной опасности с учетом функциональной пожарной опасности зданий (помещений), вместимости зальных помещений.

Таким образом, действующие требования, предъявляемые к показателям пожарной опасности декоративной отделки и облицовки стен и потолков помещений и залов театрально-концертных зданий и сооружений, во многом затрудняют применение высококачественных материалов и конструкций с требуемыми акустическими свойствами при их проектировании, строительстве, реконструкции или ремонте. В связи с этим, актуальным и правомерным становится решение ряда вопросов пожаробезопасного использования современных материалов с высоким уровнем комплекса акустических свойств в помещениях и залах оперных и драматических театров, консерваторий и др.

Целью настоящей работы являлось проведение аналитических исследований по существующему нормативному обеспечению пожаробезопасного применения акустических декоративно-отделочных материалов, выполнение сравнительных экспериментальных исследований по оценке пожарнотехнических характеристик для установления возможности разработки предложений по совершенствованию их безопасного использования в помещениях и залах зрелищных объектов.

Результаты и их обсуждение

Строительные звукоизоляционные и звукопоглощающие декоративные отделочные, облицовочные материалы и конструкции (композиции) включают в себя многообразие видов и типов, способных снижать уровень шума или активно поглощать звук.

К ним могут относиться жесткие древесноволокнистые плиты, звуконепроницаемые ткани, пеностекло, пенобетон, различного типа акустические штукатурки, вспененные полимеры, минеральная и стеклянная вата, гипсоволокнистая продукция или сочетание в конструктивных элементах указанных материалов и др., имеющих различную эффективность звукопоглощения и, следовательно, область применения [1, 2].

Вопросам совершенствования различных свойств основных применяемых в практике строительства натуральных и синтетических (целенаправленно искусственно созданных в результате химических процессов и технологий) акустических материалов посвящен ряд исследовательских работ отечественных и зарубежных авторов [3–7].

При выборе акустических материалов в зависимости от назначения помещения применяют комплексный подход, изучая геометрическое пространство звуковых волн в помещении, их отражение и поглощение поверхностями, проводят

³ Здания театрально-зрелищные. Правила проектирования: (СП 309.1325800.2017) : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 29 августа 2017 г. № 1179/пр и введен в действие с 2 марта 2018 г.

расчеты по обеспечению оптимального времени реверберации и выбирают отделочные материалы, учитывая их характеристики и экологию [8–13].

Важным обстоятельством, ввиду необходимости выполнения существующих нормативных требований пожарной безопасности при выборе акустических материалов для зальных помещений, являются их пожарно-технические характеристики. Наименее пожароопасными являются акустические материалы на основе неорганических соединений, однако при их использовании не всегда возможно обеспечить требуемые звукоизоляцию и шумопоглощение, а также необходимый декоративный вид.

В табл. 1 приведены основные характеристики и сравнительные значения коэффициента звукопоглощения при частоте 1000 Гц основных типов звукопоглощающих материалов пониженной горючести, применяемых для устройства конструкций шумопоглощения в зданиях и сооружениях.

Как следует из табл. 1, одними из самых эффективных звукопоглощающих материалов пониженной пожарной опасности, имеющими высокие значения коэффициента звукопоглощения, являются минераловатные изделия из стекловолокна или каменной ваты.

В соответствии с п. 13.1 СП 51.13330-2011 «Защита от шума»⁴, в зальных помещениях нормируется показатель времени реверберации (гулкости) в зависимости от их объема. Требования данного СП относятся к залам ожидания транспортных сооружений, стадионам и спортивным аренам, зрительным залам, включая кинозалы, актовым залам школ и другим зальным помещениям. Время реверберации в основном зависит от объема зала и от общего фонда звукопоглощения в нем. При этом для перечислен-

⁴ Защита от шума (актуализированная редакция СНиП 23-03-2003) (СП 51.13330-2011) : утвержден приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 28 декабря 2010 г. № 825 и введен в действие с 20 мая 2011 г.

Таблица 1. Основные характеристики некоторых видов звукопоглощающих материалов пониженной горючести

Table 1. The main characteristics of several types of sound absorbing materials having reduced combustibility

Наименование материала Material name	Толщина b и (или) плотность ρ Thickness b and (or) density ρ	α при частоте 1000 Гц α at the frequency of 1,000 Hz	Группа горючести (ГОСТ 30244) Combustibility group (GOST 30244)	
			Метод 1 Method 1	Метод 2 Method 2
Штукатурка гипсовая ГОСТ 31377–2008 Gypsum plaster GOST 31377–2008	$b = 10$ мм, $\rho = 1250\text{--}1450$ кг/м ³ (в уплотненном виде) $b = 10$ mm, $\rho = 1,250\text{--}1,450$ kg/m ³ (in the compacted form)	0,062	НГ Incombustible	
Штукатурка известковая ГОСТ Р 57984–2017 Lime plaster GOST R 57984–2017	$b = 10$ мм, $\rho = 1500$ кг/м ³ (в уплотненном виде) $b = 10$ mm, $\rho = 1,500$ kg/m ³ (in the compacted form)	0,085	НГ Incombustible	
Плита минераловатная ПТ 220 ГОСТ 9573–2012 Mineral wool slab PT 220 GOST 9573–2012	$b = 50$ мм $\rho = 220\text{--}230$ кг/м ³ $b = 50$ mm $\rho = 220\text{--}230$ kg/m ³	0,9		Г2 G2
Плита из стеклянного штапельного волокна ПТ 75 ГОСТ 10499–95 Slab made of glass staple fiber PT 75 GOST 10499–95	$b = 45$ мм $\rho = 66\text{--}84$ кг/м ³ $b = 45$ mm $\rho = 66\text{--}84$ kg/m ³	0,6		Г2 G2
Панель гипсобетонная ГОСТ 9574–2018 Gypsum concrete slab GOST 9574–2018	$b = 80$ мм $\rho = 1100\text{--}1500$ кг/м ³ $b = 80$ mm $\rho = 1,100\text{--}1,500$ kg/m ³	0,25	НГ Incombustible	
Лист гипсоволокнистый ГВЛ ГОСТ Р 51829–2001 Gypsum fiber sheet GVL GOST R 51829–2001	$b = 10$ мм $\rho = 720$ кг/м ² $b = 10$ mm $\rho = 720$ kg/m ²	0,37		Г1 G1
Плита газосиликатная ГОСТ 31360–2007 Gas silicate slab GOST 31360–2007	$b = 250$ мм $\rho = 500$ кг/м ³ $b = 250$ mm $\rho = 500$ kg/m ³	0,59	НГ Incombustible	

ных выше залов достижение нормативных значений времени реверберации затруднительно без отделки поверхностей помещения звукопоглощающими материалами, а также без применения специальных звукопоглощающих элементов и конструкций [14–16].

Согласно ГОСТ 23499-2009, звукопоглощающим называется материал, имеющий сквозную пористость и характеризующийся относительно высоким коэффициентом звукопоглощения α . Сквозная пористость существующих звукопоглощающих материалов обеспечивается за счет перфорации лицевого слоя или применения звукопрозрачного лицевого слоя, а также использования основы из минерального волокна с органическим связующим или древесного волокна с цементным связующим.

Звукопоглощающие материалы с перфорацией лицевого слоя демонстрируют резонансный характер звукопоглощения, что затрудняет их широкое применение для создания оптимальной акустики зальных помещений, так как они не обеспечивают гладкости реверберационной кривой в требуемом диапазоне частот. А для звукопоглощающих отделочных материалов со звукопрозрачной лицевой поверхностью основным способом крепления поверхности к основе является приклеивание при помощи органического связующего, что исключает возможность создания негорючих материалов. Вариант использования для отделки зальных помещений звукопоглощающих материалов без лицевой поверхности (т.е. матов из минерального волокна высокой плотности) не может быть рассмотрен ввиду низкой износостойкости, эстетических свойств и непригодности к очистке.

Современные звукоизолирующие и звукопоглощающие декоративно-отделочные минераловатные материалы выпускаются в виде панелей и плит, что создает дополнительные возможности в разработке разнообразных дизайнерских акустических проектов общественных залов, холлов, коридоров, галерей и т.п. [17–21].

Разработка технологий производства подобных акустических панелей и плит ведущими фирмами-изготовителями позволила успешно совместить требования по звукопоглощению с возможностью выбора формы и широкой цветовой гаммы материала, обеспечивая высококачественный декоративный внешний вид изделий.

Обе поверхности плит или панелей, как правило, имеют покрытия из различных материалов, в том числе исключаящие эмиссию частиц волокон. Лицевая поверхность проницаемая для звуковых волн покрытия плит может быть пористой и иметь фактурный декоративный вид, в том числе с использованием окрашивания. Внешний вид оформления акустическими отделочными материалами зрительного зала представлен на рисунке.



Общий вид дизайнерского проекта концертного зала
General view of the design project of the concert hall

В зависимости от акустических требований основы минераловолокнистых декоративно-отделочных плит и панелей могут иметь различные плотность $\rho_{\text{осн}}$, толщину $b_{\text{осн}}$, количество органического связующего $\gamma_{\text{осн}}$, различные типы покрытий, расходы краски β_k , а также количество вспомогательных веществ, используемых при их изготовлении, например клеи, в совокупности оказывающие существенное влияние на показатели пожарной опасности материалов.

В табл. 2 приведены сравнительные характеристики и показатели пожарной опасности акустических декоративных панелей и плит на основе минеральных волокон для стен и потолков.

Экспериментальные исследования по оценке показателей пожарной опасности акустических материалов, указанных в табл. 2, проводились стандартными методами испытаний в рамках выполнения работ по подтверждению соответствия требований ФЗ № 123 по группе горючести Г, группе воспламеняемости (определялось значение критической плотности падающего теплового потока $Q_{\text{крит}}$), коэффициенту дымообразования D_{max} и показателю токсичности продуктов горения $H_{\text{с150}}$ в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ ВНИИПО МЧС России.

Для испытаний были выбраны образцы акустических панелей серийного выпуска ряда ведущих в этой области фирм-разработчиков и производителей, имеющих сертификат системы менеджмента качества ИСО, и наиболее широко представленные в настоящее время на российском рынке строительных материалов и изделий.

Как следует из представленных экспериментальных данных, различия в характеристиках образцов звукопоглощающих материалов оказывают влияние на их свойства пожарной опасности. При этом все представленные типы материалов имеют показатели пожарной опасности Г1, В2, Д2, Т1. Данное об-

Таблица 2. Экспериментальные данные о пожарной опасности акустических материалов

Table 2. Experimental data on the fire hazard of acoustic materials

Номер образца Sample No.	Характеристики материала основы и покрытия образца звукопоглощающих панелей Characteristics of the main ingredient and the coating material of a sample of sound absorbing panels	Показатели пожарной опасности Fire hazard indicators			
		Г Combustibility	$\frac{Q_{крпг}}{Q_{крпг}}$ кВт/м ² $\frac{Q_{крпг}}{Q_{крпг}}$ kW/m ²	$\frac{D_{max}}{D_{max}}$ м ² /кг $\frac{D_{max}}{D_{max}}$ m ² /kg	H _{cl50}
1	Панель звукопоглощающая ($\alpha = 0,8-0,9$): основа — стекловата ($b_{осн} = 20$ мм, $\rho_{осн} = 55$ кг/м ³ , $\gamma = 7$ %) с двухсторонним покрытием из стеклохолста ($\rho_{покp} = 50$ г/м ²) и лицевой поверхностью с полимерной пленкой ($b_{пл} = 0,1$ мм) и краской ($\beta_k = 120$ г/м ²) Sound absorbing panel ($\alpha = 0.8-0.9$) made of glass wool ($b_{m,i} = 20$ mm, $\rho_{m,i} = 55$ kg/m ³ , $\gamma = 7$ %) with a double-sided fiberglass coating ($\rho_{coat} = 50$ g/m ²) and a front surface with a polymer film ($b_{film} = 0.1$ mm) and paint ($\beta_p = 120$ g/m ²)	Г1 Combustibility group 1	25,5	101	Более 120 More than 120
2	Панель звукопоглощающая ($\alpha = 0,8-0,9$): основа — стекловата ($b_{осн} = 20$ мм, $\rho_{осн} = 120$ кг/м ³ , $\gamma = 15$ %) с двухсторонним покрытием из стеклохолста ($\rho_{покp} = 50$ г/м ²) и окрашенной лицевой поверхностью ($\beta_k = 120$ г/м ²) Sound absorbing panel ($\alpha = 0.8-0.9$) made of glass wool ($b_{m,i} = 20$ mm, $\rho_{m,i} = 120$ kg/m ³ , $\gamma = 15$ %) with a double-sided fiberglass coating ($\rho_{coat} = 50$ g/m ²) and a painted front surface ($\beta_p = 120$ g/m ²)	Г1 Combustibility group 1	21,5	115	То же Also
3	Панель звукопоглощающая ($\alpha = 0,8-0,9$): основа — стекловата ($b_{осн} = 20$ мм, $\rho_{осн} = 55$ кг/м ³ , $\gamma = 7,5$ %) с двухсторонним покрытием из стеклохолста ($\rho_{покp} = 50$ г/м ²) и окрашенной лицевой поверхностью ($\beta_k = 50$ г/м ²) Sound absorbing panel ($\alpha = 0.8-0.9$) made of glass wool ($b_{m,i} = 20$ mm, $\rho_{m,i} = 55$ kg/m ³ , $\gamma = 7,5$ %) with a double-sided fiberglass coating ($\rho_{coat} = 50$ g/m ²) and a painted front surface ($\beta_b = 50$ g/m ²)	Г1 Combustibility group 1	20,5	105	«
4	Панель звукопоглощающая ($\alpha = 0,8-0,9$): основа — каменная вата ($b_{осн} = 40$ мм, $\rho_{осн} = 150$ кг/м ³ , $\gamma_{осн} = 4,0$ %) с двухсторонним покрытием из стеклохолста лицевая поверхность — $\rho_{покp} = 120$ г/м ² , внутренняя поверхность — $\rho_{покp} = 50$ г/м ² и окрашенной лицевой поверхностью ($\beta_k = 350$ г/м ²) Sound absorbing panel ($\alpha = 0.8-0.9$) made of rock wool ($b_{m,i} = 40$ mm, $\rho_{m,i} = 150$ kg/m ³ , $\gamma_{m,i} = 4.0$ %) with a double-sided fiberglass coating: front surface — $\rho_{coat} = 120$ g/m ² , inner surface — $\rho_{coat} = 50$ g/m ² and a painted front surface ($\beta_b = 350$ g/m ²)	Г1 Combustibility group 1	30,5	15	«
5	Панель звукопоглощающая ($\alpha = 0,8-0,9$): основа — каменная вата ($b_{осн} = 15$ мм, $\rho_{осн} = 90$ кг/м ³ , $\gamma_{осн} = 3,5$ %) с двухсторонним покрытием из стеклохолста: лицевая поверхность — $\rho_{покp} = 180$ г/м ² , внутренняя поверхность — $\rho_{покp} = 50$ г/м ² и окрашенной лицевой поверхностью ($\beta_k = 90$ г/м ²) Sound absorbing panel ($\alpha = 0.8-0.9$) made of rock wool ($b_{m,i} = 15$ mm, $\rho_{m,i} = 90$ kg/m ³ , $\gamma_{m,i} = 3.5$ %) with a double-sided coating made of fiberglass: front surface — $\rho_{coat} = 180$ g/m ² , inner surface — $\rho_{coat} = 50$ g/m ² and a painted front surface ($\beta_b = 90$ g/m ²)	Г1 Combustibility group 1	25,5	30	«

Номер образца Sample No.	Характеристики материала основы и покрытия образца звукопоглощающих панелей Characteristics of the main ingredient and the coating material of a sample of sound absorbing panels	Показатели пожарной опасности Fire hazard indicators			
		Г Combustibility	$Q_{\text{крит}}$, кВт/м ² Q_{crit} , kW/m ²	D_{max} , м ² /кг D_{max} , m ² /kg	H_{cl50}
6	Панель звукопоглощающая ($\alpha = 0,8-0,9$): основа — каменная вата ($b_{\text{осн}} = 20$ мм, $\rho_{\text{осн}} = 90$ кг/м ³ , $\gamma_{\text{осн}} = 3,5$ %) с двухсторонним покрытием из стеклохолста: лицевая поверхность — $\rho_{\text{пок}} = 120$ г/м ² , внутренняя поверхность — $\rho_{\text{пок}} = 50$ г/м ² и окрашенной лицевой поверхностью ($\beta_k = 390$ г/м ²) Sound absorbing panel ($\alpha = 0.8-0.9$) made of rock wool ($b_{m,i} = 20$ mm, $\rho_{m,i} = 90$ kg/m ³ , $\gamma_{m,i} = 3.5$ %) with a double-sided fiberglass coating: front surface — $\rho_{\text{coat}} = 120$ g/m ² , inner surface — $\rho_{\text{coat}} = 50$ g/m ² and a painted front surface ($\beta_b = 390$ g/m ²)	Г1 Combustibility group 1	22,5	45	«

стоятельство свидетельствует о достаточно высоком уровне пожаробезопасности указанных материалов, так как они не распространяют и не поддерживают горение, мало опасны по выделению токсичных летучих продуктов горения, обладают умеренной дымообразующей способностью и выдерживают воздействие теплового потока более 20 кВт/м².

Следует отметить, полученные данные по показателям пожарной опасности звукоизоляционных материалов коррелируют с результатами испытаний и классификации европейских норм.

По информации, содержащейся в отчетах по испытаниям согласно EN 13501, образцы исследованных материалов относятся к наименее пожароопасным классам: образцы № 1–3 к классу A2, s1, d0, образцы № 4–6 — к классу A1 и разрешены в странах Европы для использования в общественных зданиях и сооружениях.

Таким образом, с учетом анализа представленных в табл. 1 и 2 данных при отсутствии негорючих материалов или материалов с показателями пожарной опасности Г1, В1, Д2, Т2, а также при отсутствии обязательных требований пожарной безопасности, устанавливающих напрямую ограничения по применению акустических материалов в зальных помещениях, возникает острая необходимость в практическом решении этого вопроса. Одним из вариантов такого решения может быть разработка отдельных требований к акустическим материалам для стен и потолков зальных помещений, ориентируясь на табл. 29 ФЗ, с учетом функциональной пожарной опасности здания и вместимости зала. В этом случае обоснованным с точки зрения обеспечения пожарной безопасности и практики испытаний на пожарную опасность в качестве декоративно-отделочных и облицовочных мате-

риалов для стен и потолков могут быть допущены к применению в зданиях классов Ф 1.2; Ф 2.3; Ф 2.4; Ф 3.1; Ф 3.2; Ф 3.6; Ф 4.2; Ф 4.3; Ф 4.4; Ф 5.1 материалы пожарной опасности не выше Г1, В1, Д2, Т2 при вместимости зальных помещений более 800 человек; не выше Г1, В2, Д2, Т2 — при вместимости более 300 человек, но не более 800 человек; не выше Г2, В2, Д3, Т2 при вместимости более 50, но не более 300 человек; Г3, В2, Д3, Т2 при вместимости не более 50 человек. В зданиях классов Ф 1.1; Ф 2.1; Ф 2.2; Ф 3.3; Ф 3.4; Ф 3.5; Ф 4.1 в качестве декоративно-отделочных и облицовочных материалов могут быть допущены к применению акустические материалы пожарной опасности не выше Г1, В1, Д2, Т2 при вместимости зальных помещений более 300 человек; не выше Г1, В2, Д2, Т2 — при вместимости более 15, но не более 300 человек; не выше Г2, В2, Д3, Т2 — при вместимости не более 15 человек.

Авторы настоящей статьи считают целесообразным внести представленные требования к акустическим материалам для стен и потолков в качестве изменений в действующие нормативно-технические документы по пожарной безопасности. До внесения указанных изменений их следует учитывать при разработке специальных технических условий на многофункциональные здания, а также на здания, в которых имеются зальные помещения с необходимостью применения акустических материалов.

Выводы

На основе аналитических исследований выявлены наиболее эффективные звукопоглощающие декоративно-отделочные материалы пониженной пожарной опасности — минераловатные изделия на основе стекловолокна или каменной ваты.

Изучены нормативные документы, регламентирующие область применения отделочных материалов стен и потолков в зрительных залах, в результате чего установлено отсутствие обязательных требований по ограничению использования акустических материалов в зальных помещениях.

Проведены сравнительные экспериментальные исследования комплекса показателей пожарной опасности акустических декоративных панелей и плит на основе минеральных волокон для стен

и потолков с целью обоснования их пожаробезопасного применения в общественных зрительных залах.

Разработаны предложения по внесению изменений в действующие нормативно-технические документы по пожарной безопасности, в частности, разработка отдельных требований к акустическим материалам для стен и потолков зальных помещений, ориентируясь на табл. 29 ФЗ, с учетом функциональной пожарной опасности здания и вместимости зала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Gülru Koca*. Interior finishing materials // *Developments in Science and Engineering*. Chapter 43. St. Kliment Ohridski University Press, 2016. Pp. 588–601.
2. *Schiavoni F., D'Alessandro S., Bianchi F., Asdrubali F.* Bianchi Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62. Pp. 988–1011. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045
3. *Гусев В.П., Жоголева О.А., Леденев В.И.* Акустические и динамические характеристики эластомерных строительных материалов на основе NBR каучука // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 56–61. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-56-61
4. *Williams T.L.* The Interior Design Sourcebook. New York : Allworth Press, 2012. 224 p.
5. *Arenas J.P. Malcolm Crocker* Recent. Trends in porous sound-absorbing materials // *Sound & Vibration*. 2010. Vol. 44 (7). Pp. 12–17.
6. *Арутюнян А.Р.* Исследования изменений акустических свойств конструкционных материалов в процессе циклических испытаний : дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб., 2009. 145 с.
7. *Limin Peng, Boqi Song, Junfeng Wang, Dong Wang.* Mechanic and acoustic properties of the sound-absorbing material made from natural fiber and polyester // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. P. 274913. DOI: 10.1155/2015/274913
8. *Генпель С.А.* Некоторые проблемы выбора современных акустических материалов для отделки помещений // *Наука, образование и экспериментальное проектирование в МАРХИ : тезисы докладов международной научно-практической конференции, профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов, г. Москва, 2–6 апреля 2018 года*. М., 2018. С. 252–253.
9. *Stec A.A., Hull T.R.* Assessment of the fire toxicity of building insulation materials // *Energy and Buildings*. 2011. Vol. 43 (2-3). Pp. 498–506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
10. *Шульдешов Е.М., Платонов М.М., Нестерова Т.А., Сагомонова В.А.* Акустические полимерные материалы нового поколения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2016. № 4 (40). С. 78–84. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9
11. *Asdrubali F., Schiavoni S., Horoshenkov K.V.* A review of sustainable materials for acoustic applications // *Building Acoustics*. 2012. Vol. 19. Issue 4. Pp. 283–312. DOI: 10.1260/1351-010X.19.4.283
12. *Vercammen M.* On the revision of ISO 354, Measurement of the sound absorption in the reverberation room // *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany*. Geneva, Switzerland : ISO/WD, 2018. Pp. 3991–3997.
13. *Cheng Y., Cheng L., Pan J.* Absorption of oblique incidence sound by a finite micro-perforated panel absorber // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. Vol. 133. Issue 1. Pp. 201–209. DOI: 10.1121/1.4768869
14. *Романюк М.А.* Экспериментальные исследования акустических свойств современных строительных материалов и рекомендации по их применению для обеспечения аудиоэкологичности помещений // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2011. № 9 (122). С. 156–160. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16853365>
15. *Субботкин А.О., Щиржецкий Х.А., Алешкин В.М.* К вопросу объективной оценки влияния реального шумового фона публики на оптимизацию нормативных требований к допустимому шумовому режиму в зрительных залах // *Биосферная совместимость: человек, регион, технологии*. 2018. № 4 (24). С. 57–63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37214220>

16. D'Orazio D., Fratoni G., Rovigatti A., Hamilton B. Numerical simulations of Italian opera houses using geometrical and wave-based acoustics methods // *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*, Aachen, Germany, 9–13 September. 2019. Geneva, Switzerland : ISO/WD, 2019. Pp. 5994–5996.
17. Смирнова Е.В., Васюткина Д.И. Результаты сравнительного анализа акустических свойств строительных материалов // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2013. № 1. С. 26–29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18761370>
18. Румянцев Б.М., Жуков А.Д., Барыбин А.А., Жуков А.Ю. Структура и свойства акустических материалов // *Научное обозрение*. 2017. № 7. С. 41–44.
19. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Zelenshchikov D.B., Mustafaev R., Khimich A. Insulation systems and green sustainable construction // *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*. 2014. Vol. 1025–1026. Pp. 1031–1034. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.1031
20. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Sapelin A.N. Composite wall materials // *Italian Science Review*. 2014. Issue 2 (11). Pp. 155–157.
21. Ильина Л.В., Игнатова О.А., Каткова Т.Ф., Кучерова Э.А. Современные материалы и технологии : учебное пособие для студентов. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2012. 236 с.

REFERENCES

1. Gülru Koca. Interior Finishing Materials. *Developments in Science and Engineering*. Chapter: 43. St. Kliment Ohridski University Press, 2016; 588-601.
2. Schiavoni F., D'Alessandro S., Bianchi F., Asdrubali F. Bianchi insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016; 62:988-1011. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.045
3. Gusev V.P., Zhogoleva O.A., Ledenev V.I. Acoustic and dynamic characteristics of elastomeric building materials based on NBR rubber. *Stroitel'nye Materialy/Construction Materials*. 2019; 6:56-61. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-771-6-56-61 (rus).
4. Williams T.L. *The interior design sourcebook*. New York, Allworth Press, 2012; 224.
5. Arenas J.P. Malcolm Crocker recent. Trends in porous sound-absorbing materials. *Sound & Vibration*. 2010; 44(7):12-17.
6. Arutyunyan A.R. *Studies of changes in the acoustic properties of structural materials during cyclic tests : dissertation of the candidate of physical and mathematical sciences*. Saint Petersburg, 2009; 145. (rus).
7. Limin Peng, Boqi Song, Junfeng Wang, Dong Wang. Mechanic and acoustic properties of the sound-absorbing material made from natural fiber and polyester. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015; 274913. DOI: 10.1155/2015/274913
8. Geppel' S.A. Some problems of choosing modern acoustic materials for interior decoration. *Science, education and experimental design in MARHI : Abstracts of reports of the international scientific and practical conference, teaching staff, young scientists and students. Moscow, 2–6 April 2018*. Moscow, 2018; 252-253. (rus).
9. Stec A.A., Hull T.R. Assessment of the fire toxicity of building insulation materials. *Energy and Buildings*. 2011; 43(2-3):498-506. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.015
10. Shul'deshov E.M., Platonov M.M., Nesterova T.A., Sagomonova V.A. Acoustic polymeric materials of new generation (Review). *Trudy VIAM/Proceedings of VIAM*. 2016; 4(40):78-84. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-4-9-9 (rus).
11. Asdrubali F., Schiavoni S., Horoshenkov K.V. A review of sustainable materials for acoustic applications. *Building Acoustics*. 2012; 19(4):283-312. DOI: 10.1260/1351-010X.19.4.283
12. Vercammen M. On the Revision of ISO 354, Measurement of the Sound Absorption in the Reverberation Room. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany*. Geneva, Switzerland : ISO/WD, 2018; 3991-3997.
13. Cheng Y., Cheng L., Pan J. Absorption of oblique incidence sound by a finite micro-perforated panel absorber. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013; 133(1):201-209. DOI: 10.1121/1.4768869
14. Romanyuk M.A. Experimental study of acoustic properties of modern construction materials and recommendations for their application for rooms audio environmental support. *Izvestiya SFedU/Engineering sciences*. 2011; 9(122):156-160. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16853365> (rus).

15. Subbotkin A.O., Shchirzhetskiy Kh.A., Aleshkin V.M. To the issue of objective evaluation of actual background noise of the public on optimization of regulatory noise requirements in halls. *Biosphere compatibility: person, region, technologies*. 2018; 4(24):57-63. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37214220> (rus).
16. D'Orazio D., Fratoni G., Rovigatti A., Hamilton B. Numerical simulations of Italian opera houses using geometrical and wave-based acoustics methods. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics, Aachen, Germany, 9–13 September*. 2019. Geneva, Switzerland : ISO/WD, 2019; 5994-5996.
17. Smirnova E.V., Vasyutkina D.I. Results of comparative analysis of acoustic properties of building materials. *Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2013; 1:26-29. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18761370> (rus).
18. Rumyantsev B.M., Zhukov A.D., Barybin A.A., Zhukov A.Yu. Structure and properties of acoustic materials. *Scientific Review*. 2017; 7:41-44. (rus).
19. Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Zelenshchikov D.B., Mustafaev R., Khimich A. Insulation systems and green sustainable construction. *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering*. 2014; 1025-1026:1031-1034. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.1031
20. Zhukov A.D., Bessonov I.V., Sapelin A.N. Composite wall materials. *Italian Science Review*. 2014; 2(11):155-157.
21. Il'ina L.V., Ignatova O.A., Katkova T.F., Kucherova E.A. *Modern materials and technologies : study guide for students*. Novosibirsk, NGASU (Sibstrin), 2012; 236. (rus).

Поступила 23.08.2021, после доработки 14.09.2021;
принята к публикации 27.09.2021

Received August 23, 2021; Received in revised form September 14, 2021;
Accepted September 27, 2021

Информация об авторах

КОНСТАНТИНОВА Наталья Ивановна, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

СМИРНОВ Николай Васильевич, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 760804; ORCID: 0000-0003-3660-444X; e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

ЗУБАНЬ Андрей Владимирович, канд. техн. наук, начальник отдела, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; РИНЦ ID: 774306; ResearcherID: AAB-9575-2019; Scopus Author ID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058; e-mail: avzuban@mail.ru

Information about the authors

Nataliya I. KONSTANTINOVA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 774306; ORCID: 0000-0003-0778-0698; e-mail: konstantinova_n@inbox.ru

Nikolay V. SMIRNOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 760804; ORCID: 0000-0003-3660-444X; e-mail: firelab_vniipo@mail.ru

Andrey V. ZUBAN, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of Department, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIIPPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ID RISC: 774306; ResearcherID: AAB-9575-2019; Scopus Author ID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058, e-mail: avzuban@mail.ru

ЗУБАНЬ Ольга Петровна, старший научный сотрудник, Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 143903, Московская обл., г. Балашиха, мкр. ВНИИПО, 12; ORCID: 0000-0003-3458-5767; e-mail: opzuban@mail.ru

Olga P. ZUBAN, Senior Researcher, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, VNIPO, 12, Balashikha, 143903, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-3458-5767; e-mail: opzuban@mail.ru

Вклад авторов: *все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.*

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: *the authors contributed equally to this article.*

The authors declare no conflicts of interests.

Экспериментальное исследование пожароопасных характеристик материалов в помещениях зданий культурно-исторического наследия

Татьяна Юрьевна Еремина¹, Ольга Владимировна Сушкова²✉

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

² Государственный Эрмитаж, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время многие объекты культурного наследия стали многофункциональными зданиями, в которых обеспечивается сохранение архитектурных и конструктивных решений, не всегда соответствующих требованиям действующих норм пожарной безопасности. На таких объектах с массовым пребыванием людей должна обеспечиваться безопасная эвакуация при пожаре. Для выявления характеристик пожарной опасности материалов, способных влиять на безопасную эвакуацию людей в помещениях зданий культурного наследия, необходимо проведение экспериментальных исследований.

Цели и задачи. Исследование термической деструкции исторических материалов, состаренных в естественных эксплуатационных условиях. Анализ данных по газообразным продуктам термодеструкции старинных материалов для определения их влияния на формирование опасных факторов пожара.

Методы исследования. С целью получения достоверных исходных данных, необходимых для моделирования динамики опасных факторов пожара (ОФП) при расчете времени блокирования путей эвакуации Зимнего дворца, были проведены экспериментальные исследования по определению показателей пожарной опасности древесины различных пород и возраста, используемой в исторических изделиях и конструкциях при эксплуатации здания.

Определение пожароопасных свойств образцов древесины проводилось при поддержке испытательной лаборатории НИЦ «ПБ» ИКБС НИУ МГСУ. Исследования методами термического анализа, совмещенными с ИК-спектроскопией, проводились при поддержке лаборатории ФГБУ «СЭУ ФПС ИПЛ» по г. Санкт-Петербургу.

Результаты и их обсуждение. Анализ результатов экспериментов материалов показал, что при термодеструкции исследуемых образцов, независимо от возраста и вида древесины, наряду с выделением диоксида углерода, в определенный для каждого образца температурный промежуток происходит выделение уксусной кислоты, влияющей на параметры пожароопасности материалов.

Выводы. Проведенные впервые в России исследования продуктов термодеструкции показали необходимость учета состава газообразных продуктов, выделяемых историческими материалами в результате термического разложения, при определении расчетных величин пожарного риска. Полученные уточненные исходные данные, необходимые для моделирования динамики опасных факторов пожара (ОФП) при расчете времени блокирования путей эвакуации Зимнего дворца, могут быть использованы и на ряде других культурно-исторических объектов для обеспечения пожаробезопасности.

Ключевые слова: объекты культурного наследия; массовое пребывание людей; термодеструкция; горючесть; опасные факторы пожара

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект #FSWG-2020-0007).

Для цитирования: Еремина Т.Ю., Сушкова О.В. Экспериментальное исследование пожароопасных характеристик материалов в помещениях зданий культурно-исторического наследия // Пожаровзрывобезопасность/ Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 24–38. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.24-38

✉ Сушкова Ольга Владимировна, e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

An experimental study on flammability characteristics of materials on the premises of buildings of cultural and historical heritage

Tatyana Yu. Eremina¹, Olga V. Sushkova²✉

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

² The State Hermitage Museum, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. Many cultural heritage sites have been converted into multifunctional buildings, which preserve original architectural and structural solutions but fail to comply with effective fire safety standards in many instances. In the event of fire, safe evacuation must be organized from the facilities, that may accommodate a large number of people at a time. Experimental studies are needed to identify the flammability characteristics of materials that can affect safe evacuation from cultural heritage premises.

Goals and objectives. The co-authors suggest a study on the thermal destruction of historical materials, that have been aging in natural operating conditions. The analysis of gaseous products, emitted in the process of thermal destruction, is performed to identify the influence of ancient materials on formation of hazardous fire factors.

Research methods. Experimental studies were carried out to determine the fire hazard indicators for various types of wood, used in the operation of the building, to obtain the reliable initial data, necessary to simulate the dynamics of hazardous fire factors (OFF) when calculating the time to the blocking of escape routes from the Winter Palace.

Flammability properties of wood samples was identified with the support of the testing laboratory of the PB Research Centre at IKBS NRU MGSU. The studies, conducted using thermal analysis methods combined with IR spectroscopy, were carried out with the support from the laboratory of the Federal State Budgetary Institution "SEU FPS IPL" in St. Petersburg.

Results and discussion. The analysis of the results of experiments on materials, has proven that during the thermal destruction of the test samples, regardless of the age and type of wood, acetic acid is released within a certain temperature interval for each sample along with the release of carbon dioxide, and it affects the parameters of fire hazard characteristics of materials.

Conclusions. For the first time in Russia, products of thermal destruction of historical materials have been investigated. The data presented in the article illustrate the need for a further study on gaseous products emitted by historical materials during thermal decomposition. The data obtained by the co-authors can be used to determine the calculated values of the fire risk.

Keywords: items of cultural heritage; mass presence of a large number of people; thermal destruction; flammability; fire hazards

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project # FSWG-2020-0007).

For citation: Eremina T.Yu., Sushkova O.V. An experimental study on flammability characteristics of materials on the premises of buildings of cultural and historical heritage. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):24-38. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.24-38 (rus).

✉ Olga Vladimirovna Sushkova, e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

Введение

С целью обеспечения пожарной безопасности выставочных залов, музеев и фондохранилищ в Российской Федерации и их экспонатов определяются задачи, связанные с экспериментальным исследованием пожароопасных характеристик материалов в помещениях здания культурно-исторического наследия.

Результатом экспериментальных исследований является оценка термодеструкции образцов. Для достижения данной цели необходимо:

- провести анализ нормативных требований пожарной безопасности к объектам культурного наследия;
- изучить данные по пожарам в выставочных залах, музеях и фондохранилищах в России за период последних 20 лет;
- выбрать методы термического анализа;
- произвести отбор образцов материалов и исследовать их пожароопасные характеристики.

Для обеспечения пожарной безопасности выставочных залов, музеев и фондохранилищ в РФ и их экспонатов необходимо проанализировать проблемные вопросы [1, 2], а также вопросы, связанные с экспериментальным исследованием пожароопас-

ных характеристик материалов в помещениях здания культурно-исторического наследия.

Так, например, к объектам культурного наследия (памятникам истории и культуры) народов Российской Федерации Федеральный закон № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации»¹ относит объекты недвижимого имущества (включая объекты археологического наследия) и иные объекты с исторически связанными с ними территориями, произведениями живописи, скульптуры, декоративно-прикладного искусства, объектами науки и техники и иными предметами материальной культуры, возникшие в результате исторических событий, представляющие собой ценность с точки зрения истории, археологии, архитектуры, градостроительства, искусства, науки и техники, эстетики, этнологии или антропологии, социальной культуры и являющиеся свидетельством эпох и цивилизаций, подлинными источниками информации о зарождении и развитии культуры. В соответствии с законом № 73-ФЗ регламентиру-

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. : принят Государственной Думой 4 июля 2008 г. ; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

ются сохранение, использование и государственная охрана объектов культурного наследия.

Однако общие требования пожарной безопасности к объектам защиты установлены только Федеральным законом «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» № 123-ФЗ².

В соответствии с Федеральным законом № 123-ФЗ, к зданиям культурно-исторического наследия с размещением в них старинных экспонатов относятся объекты с различным классом функциональной пожарной опасности:

- Ф2 — здания зрелищных и культурно-просветительных учреждений (музеи, выставочные залы, театры, библиотеки);
- Ф3.7 — объекты религиозного назначения (храмы, храмовые комплексы, монастыри, церкви, колокольни, часовни);
- Ф4 — здания образовательных организаций (школы, университеты, научные организации).

Техническое регулирование в области пожарной безопасности объектов культурного наследия осуществляется в соответствии с требованиями ст. 4 Федерального закона № 123-ФЗ, за исключением объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации религиозного назначения, требования пожарной безопасности к которым устанавливаются соответствующим нормативным документом по пожарной безопасности [3].

Однако в ряде случаев положения этих федеральных законов и нормативные правовые акты, издаваемые на основе и во исполнение этих законов, на рассматриваемых объектах защиты не согласуются между собой.

Если говорить конкретно, объекты культурного наследия ранней постройки объективно не могут соответствовать современным требованиям пожарной безопасности. Поэтому на практике не всегда представляется возможным обеспечить соблюдение нормативных требований в части соответствия примененных строительных материалов [2, 4–8].

Как правило, здания культурно-исторического наследия с размещением в них старинных экспонатов относятся к объектам с массовым пребыванием людей [9]. Пожарная безопасность в зданиях и сооружениях, согласно нормативной документации Российской Федерации, основывается на соблюдении условия возможности безопасной эвакуации людей из зданий до момента блокирования путей эвакуации опасными факторами пожара. Распространение опасных факторов пожара приводит

к блокированию путей эвакуации по причине снижения видимости в дыму, а также достижения критических значений концентрации токсичных продуктов термического разложения. В связи с этим актуальным является экспериментальное исследование пожароопасных характеристик материалов в помещениях здания культурно-исторического наследия [10–11].

При этом подобные объекты являются достаточно пожароопасными и предусматривают массовое пребывание людей [12–14]. Для примера рассмотрим наиболее характерные пожары, которые произошли в России в выставочных залах, музеях и фондохранилищах на протяжении последних 20 лет (табл. 1) и послужили причиной массового уничтожения исторических ценностей, а также значительного материального ущерба.

Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют о том, что даже самые незначительные возгорания (пожары) могут привести не только к значительному материальному ущербу имущества музеев, но и к травмированию и гибели людей.

Материалы и методы

Необходимо подчеркнуть, что многие объекты — памятники культуры были построены более 100 лет назад. Одним из традиционных строительных материалов того времени служило дерево, в связи с этим для проведения исследований были отобраны образцы древесины различных пород и возраста.

1. Фрагменты заготовок из мастерской Государственного Эрмитажа, применяемых в реставрации деревянных изделий (мебели, дверей, оконных рам и т.п.), в том числе художественных паркетов.

Реставрация наборного паркета предусматривает воссоздание поврежденных участков. Замена не пригодных к эксплуатации деталей художественного паркета производится соответствующими оригиналу заготовками, с точным повторением породы дерева, примененного в первоначальном художественном решении паркета. Влажность используемой древесины соответствует влажности древесины существующего паркетного пола (рис. 1).

2. Элементы существующего исторического пола (паркетные плашки, фрагменты паркетного щита) из залов Зимнего дворца № 35 и 36.

Исторический пол монтировался после пожара в середине XIX в. (1840–х гг.). Паркетные плашки выполнены из древесины дуба (зал № 35) и ясеня (зал № 36). Защитно-декоративное покрытие утрачено полностью. Древесина паркета истерта в значительной степени. Имеются множественные глубокие механические повреждения: царапины, сколы,

² Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. : принят Государственной Думой 4 июля 2008 г. ; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

Таблица 1. Пожары в музеях, выставочных залах, фондохранилищах
Table 1. Fires in museums, exhibition halls, storage facilities

Дата Date	Объект An object	Краткое описание Facility summary
14.03.2004	Манеж, г. Москва Здание построено в 1817 г. С 1957 г. Манеж использовался для проведения выставок, концертов и других публичных мероприятий Manezh, Moscow Since 1957, it has been used as an exhibition and concert hall, as well as a venue for public events	Пожар произошел вследствие короткого замыкания. Полностью сгорели 92 картины современных и театральных художников. После пожара от здания остались только стены A short circuit caused fire. 92 paintings by contemporary and theatrical artists were completely burned down. After the fire, only building walls were left
19.02.2004	Библиотека им. Александра Блока, г. Санкт-Петербург Библиотека располагается в здании, построенном для Голландской церкви. Памятник архитектуры XIX в. регионального значения The Alexander Blok library, St. Petersburg The library is located in the structure built for the Dutch Church. It is a 19th century architectural monument of regional importance	Очаг возник в помещении картотеки. Пожаром было уничтожено 2,5 тыс. м ² . Горели все этажи трехэтажного дома и помещения на чердаке. Из здания было эвакуировано 86 чел. The fire seat was in a file cabinet. The fire destroyed 2,500 m ² . All the floors of a 3-storey building and premises in the attic were on fire. 86 persons were evacuated from the building
20.04.2004	Политехнический музей, г. Москва Музей был учрежден в 1872 г. по указу Александра II. Здание, построенное в стиле классицизма, охраняется государством Polytechnic Museum, Moscow The museum was founded in 1872 by order of Alexander II. The building, built in the classicism style, is protected by the state	Пожар произошел вследствие короткого замыкания. Горели отдел на втором этаже, перегородки второго и третьего этажей четырехэтажного здания. Из здания было эвакуировано 1600 чел., один человек пострадал A short circuit caused the fire. A department on the 2nd floor, partitions of the second and third floors of a four-story building were on fire. 1,600 persons were evacuated from the building; one person was injured
24.04.2004	Дом-музей композитора Петра Ильича Чайковского, г. Клин, Московская область Музей был открыт в 1894 г. в доме, в котором великий композитор провел последние годы House-Museum of composer Pyotr Ilyich Tchaikovsky. Klin, Moscow region The museum was opened in 1894 in the house where the great composer spent his last years	Причиной пожара послужило проведение пожароопасных работ при реставрации наружной стены деревянного здания. В результате проводимой эвакуации экспонатов значительно пострадали предметы из музейной коллекции The fire was caused by fire hazardous works during the restoration of an external wall of a wooden building. As a result of the evacuation of exhibits, articles from the museum collection were significantly damaged
22.06.2016	Музейно-выставочный центр, г. Железногорск Красноярского края Строительство здания в стиле советского классицизма закончилось в 1955 г., здание входит в архитектурный ансамбль зданий на ул. Свердлова Museum and Exhibition Centre, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Territory The construction of the building was completed in 1955. It was built in the Soviet classicism and is part of the architectural ensemble of buildings in Sverdlova Street	Пожаром был уничтожен второй этаж здания. Спасением картин занимались пожарные и сотрудники музея. Экспонаты выносили на улицу The fire destroyed the second floor of the building. Firefighters and the museum staff were involved in saving the paintings. Exhibits were taken out into the street
25.06.2020	Литературный музей им. М. Горького, Нижний Новгород Здание построено в 1882 г. в стиле эклектики. Является объектом культурного наследия регионального значения M. Gorky Literary Museum. Nizhny Novgorod The building was built in 1882 in the eclectic style. It is the item of cultural heritage of regional significance	Причиной пожара стало проведение строительных работ на объекте в период его реконструкции. Пожар продолжался 4,5 ч. Здание очень сильно пострадало The fire was caused by construction work at the facility during its reconstruction. The fire lasted 4.5 hours. The building was badly damaged

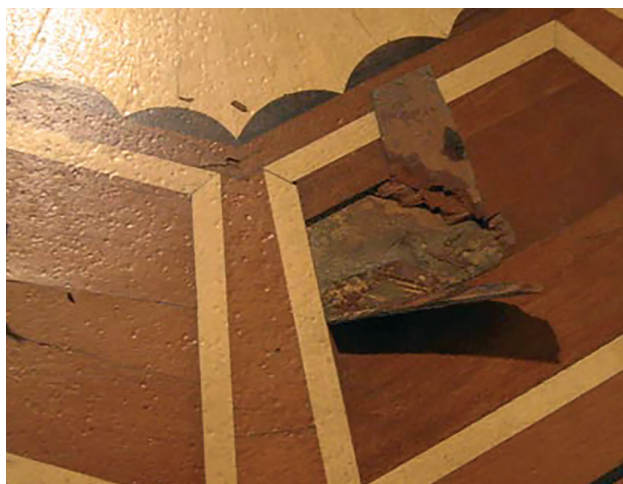


Рис. 1. Реставрация художественного паркета в Зимнем дворце

Fig. 1. Restoration of the artistic parquet in the Winter Palace

выбоины. Часть плашек фрагментирована трещинами (рис. 2).

Конструкция полов состоит из лаг и паркетных щитов из древесины сосны, на которые укладывался паркет (рис. 3). Крепление плашек к щиту осуществлялось при помощи гвоздей и клея на основе веществ животного происхождения (отходов рыб и костей животных).

С целью получения достоверных исходных данных, необходимых для моделирования динамики опасных факторов пожара (ОФП) при расчете времени блокирования путей эвакуации здания Зимнего дворца, были проведены экспериментальные исследования по определению показателей пожарной опасности различных пород древесины, примененных при эксплуатации здания, с использованием нескольких методов исследования.

Метод определения газообразных продуктов при термодеструкции

Термоаналитические характеристики и состав газообразных продуктов, выделяющихся при термическом воздействии на образец в атмосфере воздуха, определялись с применением совмещенного синхронного термического анализатора (STA 449 F3 Jupiter) с ИК-Фурье спектрометром. При нагревании образца в ТГ-анализаторе из него выделяются летучие вещества, а также продукты горения. Эти газы затем попадают в ИК-ячейку и идентифицируются на ИК-спектрометре. Благодаря тому, что в ИК-спектроскопии возможен анализ веществ по функциональным группам, такое совмещение позволяет более детально интерпретировать процессы, происходящие с образцом в ТГ-анализаторе в определенный момент времени. Подключение ТГ-ИК



a



b

Рис. 2. Исторический паркет: *a* — дубовый паркет; *b* — паркет из ясеня

Fig. 2. Historic parquet: *a* — oak parquet; *b* — ash parquet



Рис. 3. Конструкция пола

Fig. 3. Floor construction

осуществляется с помощью интерфейса для переноса выделяющихся газов TL8000.

Метод определения горючести

Экспериментальное определение горючести древесины проводилось с использованием универсальной установки для определения группы трудногорючих и горючих веществ, материалов и огнезащитных свойств покрытий и пропиточных составов для обработки древесины в соответствии с ГОСТ 12.1.044-89³.

Определение пожароопасных свойств образцов древесины проводилось при поддержке испытательной лаборатории НИЦ «ПБ» ИКБС НИУ МГСУ. Исследования методами термического анализа, совмещенными с ИК-спектроскопией, проводились при поддержке лаборатории ФГБУ «СЭУ ФПС ИПЛ» по г. Санкт-Петербургу.

Обсуждение результатов

Учитывая, что древесина активно применялась и применяется в строительстве, интерес к ее термическим характеристикам не пропадает [15–32]. Экспериментальные исследования с помощью различных методов показали, что исходные данные древесины — порода и место произрастания — оказывают влияние на пожароопасные характеристики (воспламеняемость, распространение пламени по поверхности, тепловыделение, дымообразующую способность, токсичность продуктов горения), а также на показатель низшей теплоты полного сгорания древесины и ее компонентов [18–24]. Рядом исследователей из-



учались зависимости показателей пожарной опасности древесины от ее эксплуатационного возраста [25, 26]. Выявлено, что характеристики пожарной опасности варьируются в зависимости от продолжительности старения древесины, это связано с изменениями ее химического состава и плотности. В исследовании [27] автором было установлено, что у естественно и продолжительно состаренной древесины повышается сопротивляемость воспламенению и снижается критический тепловой поток для воспламенения, а также наблюдается снижение максимальной массовой скорости выгорания общего тепловыделения в начальный период до интенсивного окисления поверхностного угольного слоя. Время до возгорания, скорость тепловыделения и время огнестойкости древесины также рассматривались в работах [28, 29].

Следует отметить, что исследований, в которых экспериментально оцениваются характеристики пожарной опасности исторических материалов, применяемых на действующих объектах культурного наследия и состаренных в естественных условиях, до настоящего времени не проводилось. В настоящей работе изучение состава газообразных продуктов термодеструкции образцов древесины в зависимости от возраста и вида древесины проводилось с использованием синхронного термического анализа, совмещенного с ИК-Фурье-спектроскопией, исследования горючести — на стандартном оборудовании в соответствии методикой ГОСТ 12.1.044-89 (п. 4.3). Описание образцов материалов и методы экспериментальных исследований представлены в табл. 2.

Исследование газообразных продуктов термодеструкции

Экспериментальные исследования с использованием термоанализатора позволяют проводить

³ ГОСТ 12.1.044-89 (ИСО 4589-84). Межгосударственный стандарт. Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения: утвержден постановлением Госстандарта СССР от 12 декабря 1989 г. № 3683.

Таблица 2. Описание образцов материалов и экспериментальных исследований

Table 2. Researched samples of materials

Описание образца Sample description	Проводимое исследование Research in progress
Образец № 1 Фрагмент заготовки для реставрации, выполненный из древесины дуба. Срок заготовки около 70 лет. Условия хранения — в закрытом отапливаемом помещении. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок светло-коричневого цвета, толщиной 20 мм Sample No. 1 Fragment of a blank for restoration made of oak wood. It is approx. 70 years old. Storage conditions: in a closed heated room. In terms of appearance, the sample is a light brown wooden block, 20 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией. Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy
Образец № 2 Фрагмент заготовки для реставрации, выполненный из современной древесины клена. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок светло-коричневого цвета, толщиной 20 мм Sample No. 2 Fragment of a blank for restoration made of maple wood. The blank is made of modern wood. In terms of appearance, the sample is a light brown wooden block, 20 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy
Образец № 3 Фрагмент заготовки для реставрации, выполненный из современной древесины грецкого ореха. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок коричневого цвета, толщиной 20 мм Sample No. 3 Fragment of a blank for restoration made of walnut wood. The blank is made of modern wood. In terms of appearance, the sample is a brown wooden block, 20 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy
Образец № 4 Фрагмент заготовки для реставрации, выполненный из современной древесины березы. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок светло-желтого цвета, толщиной 20 мм Sample No. 4 Fragment of a blank for restoration made of birch wood. The blank is made of modern wood. In terms of appearance, the sample is a light yellow wooden block, 20 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy
Образец № 5 Фрагмент заготовки для реставрации, выполненный из современной древесины сосны. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок желтого цвета, толщиной 20 мм Sample No. 5 Fragment of a blank for restoration made of pine wood. The blank is made of modern wood. In terms of appearance, the sample is a yellow wooden block, 20 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy
Образец № 6 Фрагмент заготовки для реставрации, выполненный из современной древесины лиственницы. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок бежевого цвета, толщиной 20 мм Sample No. 6 Fragment of a blank for restoration made of larch wood. The blank is made of modern wood. In terms of appearance, the sample is a beige wooden block, 20 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy

Описание образца Sample description	Проводимое исследование Research in progress
Образец № 7 Элемент паркета пола, плашка из древесины дуба. Срок эксплуатации около 160 лет. Условия эксплуатации — в закрытом отапливаемом помещении. Защитно-декоративное покрытие отсутствует. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок темно-коричневого цвета, толщиной 10 мм Sample No. 7 A parquet floor element made of an oak wood strip. Its service life is approx. 160 years old. It was used in a closed heated room. It has no protective and decorative coating. In terms of appearance, the sample is a dark brown wooden block, 10 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией; определение группы трудногорючих и горючих веществ и материалов Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy; detection of a group of low-combustible and combustible substances and materials
Образец № 8 Элемент паркета пола, плашка из древесины дуба. Срок эксплуатации около 160 лет. Условия эксплуатации — в закрытом отапливаемом помещении. Защитно-декоративное покрытие отсутствует. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок светло-коричневого цвета, толщиной 10 мм Sample No. 8 A parquet floor element, an oak wood strip. Its service life is approx. 160 years old. It was used in a closed heated room. There is no protective and decorative coating. In terms of appearance, the sample is a light brown wooden block, 10 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy
Образец № 9 Элемент паркета пола, плашка из древесины ясеня. Срок эксплуатации около 160 лет. Условия эксплуатации — в закрытом отапливаемом помещении. Защитно-декоративное покрытие отсутствует. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок светло-бежевого цвета, толщиной 19 мм Sample No. 9 A parquet floor element, an ash wood block. The service life is about 160 years. It was used in a closed heated room. There is no protective and decorative coating. In terms of appearance, the sample is a light beige wooden block, 19 mm thick	Синхронный термический анализ, совмещенный с ИК-Фурье спектроскопией; определение группы трудногорючих и горючих веществ и материалов Synchronous thermal analysis combined with FTIR spectroscopy; detection of a group of low-combustible and combustible substances and materials
Образец № 10 Фрагмент паркетного щита, выполненный из древесины сосны. Срок эксплуатации 160 лет. Условия эксплуатации — в закрытом отапливаемом помещении. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок светло-коричневого цвета, толщиной от 39 до 45 мм Sample No. 10 A fragment of a parquet board made of pine wood. The service life is 160 years. It was used in a closed heated room. In terms of appearance, the sample is a light brown wooden block with the thickness of 39 to 45 mm	Определение группы трудногорючих и горючих веществ и материалов Detection of a group of low-combustible and combustible substances and materials
Образец № 11 Фрагмент паркетного щита, выполненный из древесины сосны с сохранившимся историческим клеем на основе веществ животного происхождения. Срок эксплуатации 160 лет. Условия эксплуатации — в закрытом отапливаемом помещении. По внешнему виду образец представляет собой деревянный брусок темно-коричневого цвета, толщиной от 35 до 45 мм Sample No. 11 A fragment of a parquet board made of pine wood with historical glue of animal origin. The service life is 160 years. It was used in a closed heated room. In terms of appearance, the sample is a dark brown wooden block with the thickness of 35 to 45 mm	Определение группы трудногорючих и горючих веществ и материалов Detection of a group of low-combustible and combustible substances and materials

одновременно (в одном эксперименте и одном образце) измерения калориметрических величин при различных термодинамических переходах, измерять температуру этих переходов и регистрировать при этом изменения массы образца. Встроенный контроллер газовых потоков позволяет проанализировать выделяющиеся в процессе термодеструкции фрагмента образца газообразные продукты. Для проводимых испытаний использовались фрагменты малого размера (2,5 × 5 мм) исследуемых исторических образцов.

Результаты экспериментальных исследований образцов материалов представлены в табл. 3.

Изучение полученных термоаналитических кривых исследуемых образцов в рассматриваемом температурном диапазоне от 30 до 500 °С в атмосфере воздуха показало, что интенсивная потеря массы древесины у образцов, имеющих срок старения, происходит неоднократно. У образца № 1 (около 70 лет) — три стадии (рис. 4), у образцов № 7, 8 и 9 (около 160 лет) — две стадии (см. табл. 3).

Анализ газообразных продуктов термодеструкции показал, что независимо от возраста и вида древесины, наряду с выделением диоксида углерода, в определенный для каждого образца температурный промежуток происходит выделение уксусной

кислоты (см. табл. 3). При пожаре эти пары могут увеличивать токсическое воздействие на человека во время его эвакуации.

Исследования для классифицирования группы горючести

Для классифицирования группы горючести было подготовлено по три образца состаренной в естественных условиях древесины размером 150 × 60 мм и толщиной от 8 до 10 мм. Перед испытаниями образцы выдерживались в вентилируемом сушильном шкафу при температуре (60 ± 5) °С не менее 20 ч, затем охлаждались до температуры окружающей среды (без изъятия из шкафа), после чего определялась масса образцов. Перед испытанием внутренняя поверхность реакционной камеры покрывалась двумя слоями алюминиевой фольги толщиной 0,2 мм. Образец закрепляли в держателе и при помощи шаблона проверяли положение образца относительно его вертикальной оси. Способ крепления образцов — самостоятельный (без использования металлической сетки/стеклоткани). Перед проведением испытаний каждого из образцов контролировалась неизменность температуры газообразных продуктов горения, составляющая

Таблица 3. Результаты исследований совмещенным методом термоанализа

Table 3. Research results obtained using the combined method of thermal analysis

Номер образца Sample number	Начальная температура деструкции, t °С Initial temperature of destruction, t °С	Температура интенсивной потери массы, t °С Temperature of intense weight loss, t °С	Скорость потери массы, мг/мин Weight loss rate, mg/min	Температура выделения CO ₂ с CH ₃ COOH, t °С Temperature CO ₂ emissions with CH ₃ COOH, t °С	Процент остаточной массы при температуре, %/t °С Residual Weight Percentage at temperature, %/t °С
1	248,19	285	0,439	284	6,520/490
		325,35	0,817		
		475,59	0,576		
2	260,35	330,36	1,029	До / Up to 339,38	5,226/448
3	265	331	1	До / Up to 324	0,328/473
4	269,28	332	1,383	До / Up to 339,38	0,352/483
5	271	330,36	1,390	До / Up to 324	0,010/471
6	292	292,48	0,7	263	0,321/520
7	248,19	293,92	0,583	До / Up to 296,81	1,253/490
		434,81	0,677		
8	243,71	278	0,786	До / Up to 306,49	4,616/490
		422,62	0,709		
9	247,52	312	7,591	До / Up to 302,48	1,554/490
		437,92	6,609м		

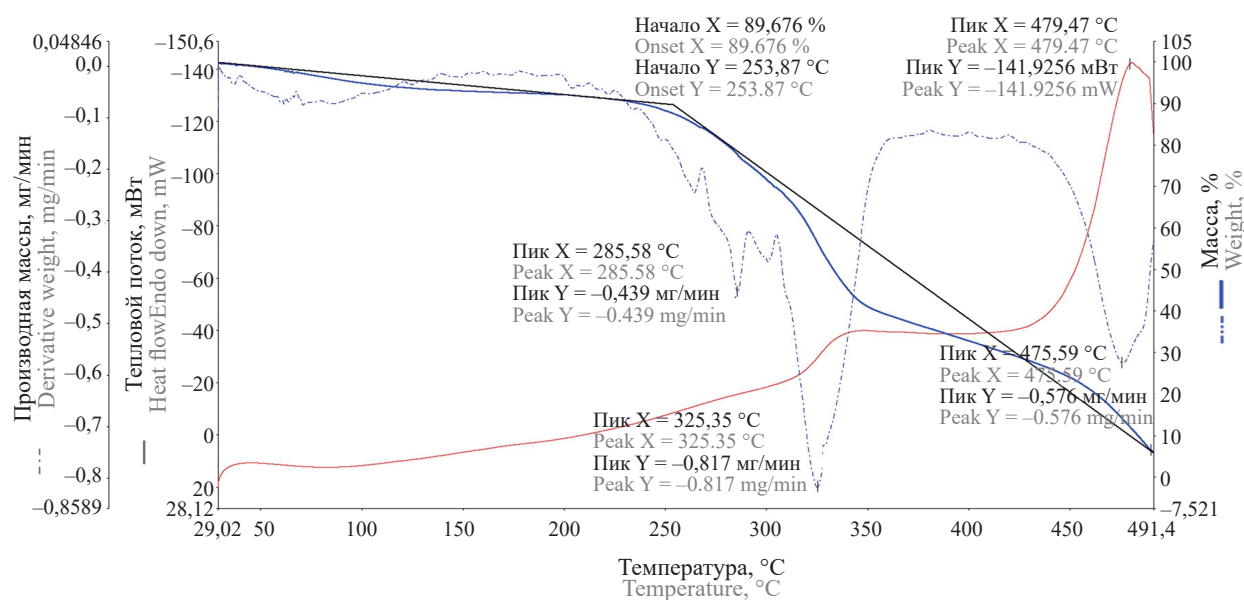


Рис. 4. Вид термоаналитических кривых образца № 1 (дуб) в атмосфере воздуха

Fig. 4. Thermoanalytical curves of sample 1 (oak) in the air

200 ± 5 °C в течение 3 мин. Результат исследования позволил классифицировать образцы по горючести и воспламеняемости.

Результаты экспериментального определения группы трудногорючих и горючих твердых веществ и материалов представлены в табл. 4.

Анализ результатов экспериментального исследования показал, что все образцы древесины классифицируются как горючие материалы средней воспламеняемости и могут представлять опасность распространения пламени по помещению. Разница в полученных значениях максимальной температу-

Таблица 4. Результаты экспериментального определения горючести образцов древесины.

Table 4. The results of experimental determination of combustibility of wood samples

Номер образца Sample No.	Номер экземпляра образца Sample instance No.	Максимальное приращение температуры, °C Maximum temperature increment, °C	Время достижения максимальной температуры, с Time to maximum temperature, s	Потеря массы образца, % Sample weight loss, %	Отнесение образцов к горючим или трудногорючим Classification of samples as combustible or low-combustible
Образец № 7 Sample 7	1	592	105	86	Горючие, средней воспламеняемости Combustible material, medium flammability
	2	583	103	93	
	3	533	186	87	
Образец № 9 Sample 9	1	436	100	55	Горючие, средней воспламеняемости Combustible material, medium flammability
	2	484	104	39	
	3	469	97	55	
Образец № 10 Sample 10	1	388	122	44	Горючие, средней воспламеняемости Combustible material, medium flammability
	2	440	149	47	
	3	420	113	34	
Образец № 11 Sample 11	1	460	69	15	Горючие, средней воспламеняемости Combustible material, medium flammability
	2	445	79	18	
	3	465	80	22	

ры, времени ее достижения и потери массы может быть связана с различиями свойств породы и возраста древесины.

В настоящее время для расчета блокирования путей эвакуации ОФП используются усредненные параметры пожарной нагрузки, указанные в различных справочниках и технической литературе. Проведенные экспериментальные исследования характеристик пожарной опасности исторических материалов древесины из здания Зимнего дворца показали, что значения показателей могут отличаться от значений показателей пожарной опасности традиционных материалов в имеющихся информационных пособиях. Принимая во внимание то, что в России и во всем мире большинство объектов культурного наследия являются объектами массового пребывания людей, изучение влияния свойств исторической древесины на ее пожароопасные свойства представляется важным направлением. В дальнейшем результаты исследований могут быть внесены в справочники и использованы при расчете блокирования путей эвакуации ОФП на исторических объектах.

Выводы

Проведенные экспериментальные исследования пожароопасности древесины, применяемой на культурно-историческом объекте — здании Зимнего дворца, показали следующее.

Результаты исследования совмещенными методами синхронного термического анализа с ИК-Фурье-спектроскопией исторических материалов выявили, что при термодеструкции исследуемых образцов независимо от возраста и вида древесины, наряду с выделением диоксида углерода, в определенный для каждого образца температурный промежуток происходит выделение уксусной кислоты.

Экспериментальная оценка горючести образцов древесины показала, что все образцы состаренной древесины классифицируются как горючие материалы средней воспламеняемости.

Полученные данные могут быть использованы для уточненного расчета динамики развития пожара в помещениях исторических зданий для обеспечения безопасной эвакуации людей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Устинова В.Г., Какаулин С.П. Анализ пожарной безопасности на объектах культурного наследия города Иркутска // Техносферная безопасность в XXI веке : сб. науч. тр. магист., асп. и мол. уч. г. Иркутск, 27–28 ноября 2017 г. Иркутск, 2017. С. 177–183.
2. Мишечкина А.В. Обеспечение норм пожарной безопасности музейно-выставочных объектов на примере МБУК «Сургутский краеведческий музей» // Актуальные научные исследования в современном мире. 2021. № 1-1 (69). С. 206–211. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44846752>
3. Присадков В.И., Мусликова С.В., Ушаков Д.В., Абашкин А.А. Обеспечение пожарной безопасности объектов культурного наследия // Ройтмановские чтения : сб. мат. VIII науч.-практ. конф., г. Москва, 5 марта 2020 г. / под ред. Б.Б. Серкова. М., 2020. С. 91–94. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880357>
4. Магомедов В.Б., Фомин А.В. Нормативно-техническое регулирование пожарной безопасности объектов культурного наследия Саратовской области // Перспективы развития науки в современном мире : сб. науч. ст. по мат. IV Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2020. С. 16–29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44255988>
5. Востокова О.В. Модели и методы оценки пожарно-охранной системы безопасности учреждений культуры: на примере федерального государственного учреждения культуры «Русский музей» : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2011. С. 143–153.
6. Богданов А.В. Интегрированная система пожарно-охранной безопасности крупного музейного комплекса (на примере Государственного Эрмитажа) : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2004. 177 с.
7. Еремина Т.Ю., Тихонова Н.В. Пожарная безопасность исторических зданий // Пожарная безопасность. 2017. № 2. С. 99–107. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29328079>
8. Устинова В.Г., Какаулин С.П. Анализ пожарной безопасности на объектах культурного наследия города Иркутска // Техносферная безопасность в XXI веке : сб. науч. тр. магист., асп. и докторантов. Иркутск, 2017. С. 177–183.
9. Присадков В.И., Мусликова С.В., Ушаков Д.В., Абашкин А.А. Вопросы приспособления объектов культурного наследия для современного использования // Актуальные проблемы пожарной безопасности : мат. XXXII Междунар. науч.-практ. конф. г. Балашиха, 5–6 ноября 2020 г. Балашиха, 2020. С. 596–599.

10. *Поспелова А.В.* Особенности внедрения комплексной системы пожарной безопасности на объектах культуры // Пожарная и аварийная безопасность : сб. мат. XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. Году культуры безопасности. 2018. С. 203–206.
11. *Копылов С.Н., Казаков А.В., Бухтояров Д.В., Смирнов Н.В.* Выбор огнетушащего вещества для автоматического пожаротушения в запасниках культурных ценностей и музеях. Часть 1. Тонкораспыленная вода // Пожарная безопасность. 2017. № 3. С. 50–53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30014172>
12. *Присадков В.И., Абашкин А.А., Зуева А.С., Мусликова С.В., Ушаков Д.В., Присадков К.В.* Особенности обеспечения пожарной безопасности исторических зданий с многоуровневыми антресолями // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 4 (37). С. 135–142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44332449>
13. *Присадков В.И., Ушаков Д.В., Абашкин А.А., Мусликова С.В., Присадков К.В.* Возможности гармонизации требований федеральных законов от 25.06.2002 № 73-ФЗ «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» и от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (на примере объектов религиозного назначения) // Современные проблемы гражданской защиты. 2020. № 3 (36). С. 99–109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43956600>
14. *Виноградова О.Н., Михайлов И.П.* Пожары, повлиявшие на архитектурный облик городов // Проблемы обеспечения безопасности (Безопасность-2021) : мат. III Междунар. науч.-практ. конф. В 2-х томах. Уфа, 2021. С. 109–113. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46222606>
15. *White R.H.* Analytical methods for determining fire resistance of timber members // SFPE handbook of fire protection engineering. Springer, 2016. Pp. 1979–2011. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_55
16. *Zelinka S.L., Hasburgh L.E., Bourne K.J., Tucholski D.R., Ouellette J.P., Kochkin V. et al.* Compartment fire testing of a two-story mass timber building // Energy Technology. 2018. Vol. 5. Pp. 1179–1185.
17. *Hill C.A.* Thermal modification of wood // Wood modification: chemical, thermal and other processes. Hill C.A. (ed.) Wiley, West Sussex, UK, 2007. Pp. 99–126.
18. *Shafizadeh F., Chin P.P.* Thermal deterioration of wood // Wood Technol: Chem Aspects. 1977. Vol. 43. Pp. 57–8.1
19. *Nzokou P., Pascal Kamdem D.* X-ray photoelectron spectroscopy study of red oak- (*Quercus rubra*), black cherry- (*Prunus serotina*) and red pine- (*Pinus resinosa*) extracted wood surfaces // Surface and Interface Analysis. 2005. Vol. 37. Pp. 689–694. DOI: 10.1002/sia.2064
20. *Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б.* Горение и пожарная опасность древесины // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2012. Т. 21. № 1. С. 19–32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710>
21. *Inari G.N., Petrissans M., Lambert J., Ehrhardt J., Gérardin P.* XPS characterization of wood chemical composition after heat-treatment // Surface and Interface Analysis. 2006. Vol. 38. Issue 10. Pp. 1336–1342. DOI: 10.1002/sia.2455
22. *Bañuls-Ciscar J., Abel M.-L., Watts J.F.* Characterisation of cellulose and hardwood organosolv lignin reference materials by XPS // Surface and Interface Analysis. 2016. 23. Pp. 1–8. DOI: 10.1116/1.4943099
23. *Hua X., Kaliaguine S., Kokta B., Adnot A.* Surface analysis of explosion pulps by ESCA Part 2. Oxygen (1s) and sulfur (2p) spectra // Wood Science and Technology. 1993. Vol. 28. Pp. 449–459.
24. *Xu Q., Chen L., Harries K.A., Zhang F., Liu Q., Feng J.* Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 96. Pp. 416–427. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.062
25. *Kraniotis D., Nore K., Brückner C., Nyruud A.Q.* Thermography measurements and latent heat documentation of Norwegian spruce (*Picea abies*) exposed to dynamic indoor climate // Journal of Wood Science. 2016. Vol. 62. Pp. 203–209. DOI: 10.1007/s10086-015-1528-1
26. *Лоскутов С.Р., Шапченко О.А., Анискина А.А.* Термический анализ древесины основных лесообразующих пород средней Сибири // Сибирский лесной журнал. 2015. № 6. С. 17–30. DOI: 10.15372/SJFS20150602

27. Тарасов Н.И. Система оценки влияния эксплуатационных и теплофизических факторов на пожароопасные характеристики древесных материалов : дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013. 171 с.
28. Сивенков А.Б., Тарасов Н.И., Алексеева Т.С. Влияние срока эксплуатации жилых и нежилых деревянных строений на пожароопасные свойства древесины // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 2. С. 27–35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16342819>
29. Покровская Е.Н., Пищик И.И., Смирнов Н.В., Нагановский Ю.К. Термическая устойчивость древесины различной длительности эксплуатации // Строительные материалы. 2000. № 9. С. 34–35.
30. Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б. Влияние естественного старения на физико-химические и пожароопасные свойства древесины // Известия ЮФУ. Технические науки. АГПС. 2014. № 9(158). С. 206–217. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22540241>
31. Delichatsios M.A., Panagiotou T.H., Kiley F. The use of time to ignition data for characterizing the thermal inertia and the minimum (critical) heat flux for ignition or pyrolysis // Combustion and Flame. 1991. Vol. 84. Issue 3–4. Pp. 323–332. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90009-Z
32. Harada T. Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test // Fire Mater. 2001. Vol. 25. Issue 4. Pp. 161–167. DOI: 10.1002/fam.766

REFERENCES

1. Ustinova V.G., Kakaulin S.P. Analysis of fire safety on the objects of cultural heritage of the city of Irkutsk. *Technosphere Safety in the XXI Century : collection of scientific works of undergraduates, graduate students and young scientists. Irkutsk, November 27–28, 2017*. Irkutsk, 2017; 177–183. (rus).
2. Mishechkina A.V. Ensuring fire safety standards for museum and exhibition facilities on the example of MBUK “Surgut museum of local lore”. *Actual scientific research in the modern world*. 2021; 1-1(69):206-211. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44846752> (rus).
3. Prisadkov V.I., Muslakova S.V., Ushakov D.V., Abashkin A.A. Ensuring fire safety of cultural heritage sites. *Roitman's Readings : Collection of materials of the VIII scientific-practical conference. Edited by B.B. Serkov*. Moscow, 2020; 91-94. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42880357> (rus).
4. Magomedov V.B., Fomin A.V. Normative and technical regulation of fire safety of objects of cultural heritage of the Saratov region. *Prospects for the Development of Science in the Modern World : Collection of scientific articles based on the materials of the IV International Scientific and Practical Conference*. Ufa, 2020; 16-29. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44255988> (rus).
5. Vostokova O.V. *Models and methods of assessing the fire and security system of safety of cultural institutions: on the example of the federal state cultural institution “Russian Museum” : dissertation ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2011; 143-153. (rus).
6. Bogdanov A.V. *Integrated fire and security system of a large museum complex (by the example of the State Hermitage : dissertation ... candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2004; 177. (rus).
7. Eremina T.Yu., Tikhonova N.V. Fire safety of historic buildings. *Fire safety*. 2017; 2:99-107. (rus).
8. Ustinova V.G., Kakaulin S.P. Analysis of fire safety at cultural heritage sites of the city of Irkutsk. *Technosphere safety in the XXI century : collection of scientific papers of undergraduates, graduate students and doctoral students*. Irkutsk, 2017; 177-183. (rus).
9. Prisadkov V.I., Muslakova S.V., Ushakov D.V., Abashkin A.A. Questions of adaptation of cultural heritage objects for modern use. *Actual Problems of Fire Safety : Materials of the XXXII International Scientific and Practical Conference. Balashikha, November 5–6, 2020*. Balashikha, 2020; 596-599. (rus).
10. Pospelova A.V. Features of the implementation of an integrated fire safety system at cultural facilities In the collection: Fire and emergency safety. *Collection of materials of the XIII International Scientific and Practical Conference dedicated to the Year of Safety Culture*. 2018; 203-206. (rus).
11. Kopylov S.N., Kazakov A.V., Bukhtoyarov D.V., Smirnov N.V. The choice of extinguishing agent for automatic fire suppression in the vaults of cultural values and museums. Part 1. Water mist. *Fire safety*. 2017; 3:50-53. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=30014172> (rus).

12. Prisadkov V.I., Abashkin A.A., Zueva A.S., Muslakova S.V., Ushakov D.V., Prisadkov K.V. Fire safety features historic buildings with multi-level mezzanines. *Modern Problems of Civil Protection*. 2020; 4(37):135-142. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44332449> (rus).
13. Prisadkov V.I., Ushakov D.V., Abashkin A.A., Muslakova S.V., Prisadkov K.V. Opportunities for harmonization of federal law requirements from 25.06.2002 No. 73-fl "About objects of cultural heritage (historical and cultural monuments) of the peoples of the russian federation" and from 22.07.2008 No. 123-fl "Technical regulations on fire safety requirements" (on the example of religious objects). *Modern problems of civil protection*. 2020; 3(36):99-109. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43956600> (rus).
14. Vinogradova O.N., Mikhailov I.P. Fires that affected the architectural appearance of cities. *Problems (Security-2021) : Materials of the III International Scientific and Practical Conference*. In 2 vol. Ufa, 2021; 109-113. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46222606> (rus).
15. White R.H. Analytical methods for determining fire resistance of timber members. *SFPE handbook of fire protection engineering*. Springer, 2016; 1979-2011. DOI: 10.1007/978-1-4939-2565-0_55
16. Zelinka S.L., Hasburgh L.E., Bourne K.J., Tucholski D.R., Ouellette J.P., Kochkin V. et al. Compartment fire testing of a two-story mass timber building. *Energy Technology*. 2018; 5:1179-1185.
17. Hill C.A. Thermal modification of wood. *Wood modification: chemical, thermal and other processes*. Hill C.A. (ed.). Wiley, West Sussex, UK, 2007; 99-126.
18. Shafizadeh F., Chin P.P. Thermal deterioration of wood. *Wood Technol: Chem Aspects*. 1977; 43:57-81.
19. Nzokou P., Pascal Kamdem D. X-ray photoelectron spectroscopy study of red oak- (*Quercus rubra*), black cherry- (*Prunus serotina*) and red pine- (*Pinus resinosa*) extracted wood surfaces. *Surface and Interface Analysis*. 2005; 37:689-694. DOI: 10.1002/sia.2064
20. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Combustion and fire safety of wooden materials. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2012; 21(1):19-32. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17326710> (rus).
21. Inari G.N., Petrissans M., Lambert J., Ehrhardt J., Gérardin P. XPS characterization of wood chemical composition after heat-treatment. *Surface and Interface Analysis*. 2006; 38(10):1336-1342. DOI: 10.1002/sia.2455
22. Bañuls-Ciscar J., Abel M.L., Watts J.F. Characterization of cellulose and hardwood organosolv lignin reference materials by XPS. *Surface and Interface Analysis*. 2016; 23:1-8. DOI: 10.1116/1.4943099
23. Hua X., Kaliaguine S., Kokta B., Adnot A. Surface analysis of explosion pulps by ESCA Part 2. Oxygen (1s) and sulfur (2p) spectra. *Wood Sci Technol*. 1993; 28:449-459.
24. Xu Q., Chen L., Harries K.A., Zhang F., Liu Q., Feng J. Combustion and charring properties of five common constructional wood species from cone calorimeter tests. *Construction and Building Materials*. 2015; 96:416-427. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.08.062
25. Kraniotis D., Nore K., Brückner C., Nyrud A.Q. Thermography measurements and latent heat of documentation Norwegian spruce (*picea abies*) exposed to dynamic indoor climate. *Journal of Wood Science*. 2016; 62:203-209. DOI: 10.1007/s10086-015-1528-1
26. Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal analysis of wood of the main tree species of central Siberia. *Siberian Forestry Journal*. 2015; 6:17-30. DOI: 10.15372/SJFS20150602 (rus).
27. Tarasov N.I. *The system for assessing the impact of operational and thermal-physical factors on the fire hazard characteristics of wood materials : dissertation ... Candidate of technical sciences*. St. Petersburg, 2013; 171. (rus).
28. Sivenkov A.B., Tarasov N.I., Alekseeva T.S. Influence of operational age of inhabited and uninhabited wood buildings on fire-hazards properties of wood. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*. 2010; 2:27-35. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=16342819> (rus).
29. Pokrovskaya E.N., Pishchik I.I., Smirnov N.V., Naganovsky Yu.K. Thermal stability of wood with different duration of operation. *Building material*. 2000; 9:34-35. (rus).
30. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. Natural ageing effect on physicochemical and flammable properties of the wood. *Izvestiya SFedU. Engineering sciences*. 2014; 9(158):206-217. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22540241> (rus).
31. Delichatsios M.A., Panagiotou T.H., Kiley F. The use of time to ignition data for characterizing the thermal inertia and the minimum (critical) heat flux for ignition or pyrolysis. *Combustion and Flame*. 1991; 84(3-4):323-332. DOI: 10.1016/0010-2180(91)90009-Z
32. Harada T. Time to ignition, heat release rate and fire endurance time of wood in cone calorimeter test. *Fire Mater*. 2001; 25(4):161-167. DOI: 10.1002/fam.766

Поступила 10.10.2021, после доработки 15.11.2021;
принята к публикации 06.12.2021

Received October 10, 2021; Received in revised form November 15, 2021;
Accepted December 6, 2021

Информация об авторах

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

СУШКОВА Ольга Владимировна, начальник сектора пожарной безопасности, Государственный Эрмитаж, Россия, 190000, г. Санкт-Петербург, Дворцовая наб., 34; РИНЦ ID: 1124053; ORCID: 0000-0001-6549-1638; e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

Вклад авторов:

Еремина Т.Ю. — научное руководство, концепция исследования, редактирование и доработка текста, формулировка итоговых выводов.

Сушкова О.В. — планирование исследования, подготовка образцов, обобщение результатов исследования, написание исходного текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavl'shoss, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Olga V. SUSHKOVA, Head of Fire Safety Sector, the State Hermitage Museum, Dvortsovaya emb., 34, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation; ID RISC: 1124053; ORCID: 0000-0001-6549-1638; e-mail: sushkova.ov@hermitage.ru

Authors' contributions:

Eremina T.Yu. — scientific leadership, research concept, editing and revision of the text, formulation of the final conclusions.

Sushkova O.V. — research planning, preparation of samples, generalization of research results, writing the source text, final conclusions.

The authors declare that they have no conflicts of interest.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 39–51
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):39-51

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 519.841

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.39-51>

Применение машинообучаемых цепей Маркова для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития

**Николай Григорьевич Топольский¹, Валерий Яковлевич Вилисов^{2✉},
Ренат Шамильевич Хабибулин¹, Борис Михайлович Пранов³,
Феликс Владимирович Демехин⁴**

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Московская обл., г. Королев, Россия

³ Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, г. Москва, Россия

⁴ Региональная общественная организация содействия развитию деятельности в сфере пожарной безопасности «Коллегия пожарных экспертов», г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Моделирование процессов развития и ликвидации пожаров требует учета большого количества случайных факторов о среде пожара и доступных ресурсах для его ликвидации. Важной особенностью развития пожаров является их пошаговый характер, где одна фаза (стадия) закономерно сменяется другой в результате как протекания физических процессов горения, так и решений, принятых в тех или иных состояниях пожара. В практике моделирования многофазных (многостадийных) процессов широко используются такие их модели, как деревья решений, многошаговые позиционные игры, случайные процессы, в числе которых значимое место занимают дискретные цепи Маркова, и др. Все эти модели имеют каждая свою структуру и параметры. Выбор структуры модели для той или иной прикладной задачи является эвристическим шагом. Параметры моделей практически всегда задаются, исходя из логических умозаключений, физики протекающих процессов и имеющихся статистических данных о моделируемом явлении. Такой подход обычно называют нормативным. Его альтернативой является адаптивный подход, при котором параметры моделей оцениваются по ретроспективным данным. Такой подход позволяет построить достаточно адекватные реальным объектам модели, способные адаптироваться к нестационарностям среды и изменчивости предпочтений ЛПР.

Актуальность исследования заключается в разработке технологии машинного обучения марковских моделей процесса развития пожара, позволяющих прогнозировать время завершения как отдельных его фаз, так и пожара в целом. Марковская модель может служить и основой определения оптимального ранга пожара.

Цели и задачи. Целью работы является создание и апробация технологии построения моделей, позволяющих строить оценки времени завершения пожара. В соответствии с этой целью поставлены и задачи машинного обучения модели и ее использования для прогнозирования и определения ранга пожара.

Методы. В исследовании использованы методы теории случайных процессов, математическая статистика, имитационное моделирование, технико-экономическое оценивание. Исследование основано на материалах отечественных и зарубежных публикаций.

Результаты и их обсуждение. Предложенный метод машинного обучения цепей Маркова по статистическим данным о времени реагирования пожарно-спасательных подразделений, а также использование обученных моделей и технико-экономических оценок для назначения оптимального ранга пожара позволяют применять построенные на их основе алгоритмы в составе систем поддержки принятия решений пожарной безопасности.

Выводы. Представленные результаты решения задачи построения адекватных моделей для прогнозирования фаз развития пожара и определения ранга пожара дают основание для построения эффективных систем поддержки принятия решений на оперативном горизонте управления пожарной безопасностью.

Ключевые слова: время реагирования; платежная функция; байесовские оценки; рекуррентная процедура оценивания; имитационное моделирование

Для цитирования: Топольский Н.Г., Вилисов В.Я., Хабибулин Р.Ш., Пранов Б.М., Демехин Ф.В. Применение машинообучаемых цепей Маркова для определения ранга пожара и прогнозирования фаз его развития // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 39–51. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.39-51

✉ Вилисов Валерий Яковлевич, e-mail: vvib@yandex.ru

Application of Markov chains to rank fires and forecast fire development phases

Nikolay G. Topolskiy¹, Valeriy Ya. Vilisov²✉, Renat Sh. Khabibulin¹,
Boris M. Pranov³, Felix V. Demekhin⁴

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Moscow Region, Korolev, Russian Federation

³ Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

⁴ Panel of Fire Experts Regional Public Organization for Promoting Fire Safety Assurance Activities, St. Petersburg, Russia

ABSTRACT

Introduction. The simulation of fire development and suppression processes must take account of a large number of random factors concerning the fire environment and the resources, available for its putting out. An important feature of the fire development is its step-by-step nature, whereby one phase (stage) is naturally replaced by another as a result of physical combustion processes and decisions made amid certain states of fire. In the practice of modeling multiphase (multistage) processes, such models as decision trees, multistep positional games, random processes, including discrete Markov chains, and others are widely used. Each of these models has its own structure and parameters. The choice of the model structure for a particular application represents a heuristic step. In almost every case, parameters of models are set on the basis of logical inferences, physics, ongoing processes and available statistical data about the simulated phenomenon. This approach is usually referred to as normative. Its alternative is an adaptive approach, whereby model parameters are evaluated using historical data. This approach allows to make models that are sufficiently similar to real objects and capable of adapting to the nonstationary features of the environment and the changeability of the decision maker's preferences.

The relevance of the study lies in the development of a machine learning technology for the Markov models of the fire development process, which allow predicting the completion time of individual phases and the whole fire. The Markov model can also serve as the basis for determining the optimal fire rank.

Goals and objectives. The aim of the work is to create and test the technology for designing models that allow to make projections of the fire completion time. The tasks of the model machine learning and its use as a tool for making projections and determining the rank of fire are set in line with this goal.

Methods. The authors used methods of the theory of random processes, mathematical statistics, simulation modeling, technical and economic evaluations. The research is based on materials extracted from domestic and foreign publications.

Results and discussion. The proposed method, designated for the machine learning of the Markov chains using statistical data on the response time of firefighting and rescue units, coupled with the use of trained models, technical and economic evaluations for assigning optimal fire ranks allow to apply algorithms built on their basis as part of fire safety decision support systems.

Conclusions. The presented solutions to the problem of designing adequate models designated for projecting fire development phases and assigning fire ranks serve as the basis for effective decision support systems in terms of the short-term fire safety management.

Keywords: response time; payment function; Bayesian estimates; recurrent evaluation procedure; simulation

For citation: Topolskiy N.G., Vilisov V.Ya., Khabibulin R.Sh., Pranov B.M., Demekhin F.V. Application of Markov chains to rank fires and forecast fire development phases. *Pozharovzryvbezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):39-51. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.39-51 (rus).

✉ Valeriy Yakovlevich Vilisov, e-mail: vvib@yandex.ru

Введение

Моделирование процессов развития и ликвидации пожаров требует учета, как правило, большого количества случайных факторов и разнообразных данных о среде пожара и доступных ресурсах для его ликвидации [1–3]. Важной особенностью развития пожаров является их пошаговый характер, где одна фаза (стадия) закономерно сменяется другой в результате как протекания физических процессов горения, так и решений, принятых в тех или иных состояниях пожара.

В практике моделирования многофазных (много-стадийных) процессов широко используются такие их модели, как деревья решений, многошаговые позиционные игры, случайные процессы, в числе которых значимое место занимают дискретные цепи Маркова, и др. [4, 5]. Все эти модели имеют каждая свою структуру (как взаимосвязь основных ее составляющих элементов) и параметры. Выбор структуры модели для той или иной прикладной задачи, как правило, является эвристическим шагом (за исключением применения методов дискриминации моделей по их структуре). Параметры же моделей практически всег-

да задаются, исходя из логических умозаключений, физики протекающих процессов и имеющихся статистических данных о моделируемом явлении, что полностью соответствует исходной (архаичной) методологии исследования операций, сложившейся более 80 лет назад. Такой подход к построению моделей обычно называют нормативным. Его альтернативой (или развитием) является адаптивный подход [5–7], при котором параметры моделей оцениваются по ретроспективным данным о решениях, принятых и реализованных опытными лицами, принимающими решения (ЛПР). Такой подход позволяет построить достаточно адекватные реальным объектам модели, способные адаптироваться (в новых циклах обучения) к нестационарностям среды и изменчивости предпочтений ЛПР.

Методы машинного обучения [5, 8–11] как один из инструментов искусственного интеллекта дают возможность снять априорную и текущую параметрическую и/или структурную неопределенность моделей, тем самым обеспечив необходимую степень их адекватности. Важной особенностью разработанных алгоритмов машинного обучения является то, что обучающая выборка содержит позитивный опыт принятия решений ЛПР в соответствующем секторе предметной области. Обученные модели могут быть использованы в диалоговом режиме в составе систем поддержки принятия решений (СППР, *Decision Support System — DSS*) систем пожарной безопасности [12–18].

В статье проиллюстрирована разработанная авторами [6] технология машинного обучения моделей, в том числе оптимизационных, применительно к цепям Маркова (далее: марковские цепи — МЦ, управляемые МЦ — УМЦ), в контексте стадий (фаз) развития и ликвидации пожара. Обучение МЦ выполняется в соответствии с рекуррентным алгоритмом, обрабатывающим поступающие наборы размеченных данных. Выборка данных включает в себя показатели времени реагирования пожарно-спасательных подразделений (ПСП). Обученная МЦ позволяет строить прогнозы времени завершения той или иной фазы или пожара в целом. Кроме того, обученная МЦ позволяет и делать оценки оптимального ранга пожара на основе учета экономических показателей пожаротушения.

Алгоритм обучения цепи Маркова

Согласно приказу МЧС России № 727 от 26 декабря 2014 г. «О совершенствовании деятельности по формированию электронных баз данных учета пожаров (загораний) и их последствий», при регистрации данных о пожарах регистрируются, в числе других, временные характеристики ключевых событий, отражающих стадии (фазы) развития и тушения

пожаров, из которых шесть исходных и несколько укрупненных. Далее рассматриваются (без потери общности подхода) три укрупненные стадии:

- *свободное горение* продолжительностью $\tau_{св.г}$ — стадия, продолжительность которой равна интервалу времени с момента обнаружения пожара до момента подачи первого ствола;
- *тушение*, продолжительностью $\tau_{туш}$ — стадия, продолжительность которой равна интервалу времени с момента подачи первого ствола до момента ликвидации открытого горения;
- *ликвидация последствий пожара* $\tau_{л.пос}$ — стадия, продолжительность которой равна интервалу времени с момента ликвидации открытого горения до момента ликвидации последствий пожара.

Каждой из этих стадий пожара *поставлено в соответствие одно из состояний марковской цепи*. Кроме того, для учета в модели факта, что пожар ликвидирован, добавлено состояние «Нет пожара». МЦ устроены так, что процесс наблюдается и может переходить из одного состояния в другое в дискретные моменты времени. Затем покажем, как, имея в качестве исходных статистических данных, характеристики времени реагирования ПСП, можно оценить все элементы МЦ, отражающей динамику развития пожара [5]. Далее в качестве статистических данных были использованы сведения о пожарах в городах России [19, 20].

Формализованное представление МЦ заключается в том, что ее состояния ($s_i, i = \overline{1, m}$) изменяются в дискретные моменты времени ($t = 0, 1, 2, \dots, N$) в соответствии с вероятностями перехода ($p_{ij}, i, j = \overline{1, m}$) за один шаг из текущего (i -го) состояния в последующее (j -е). Марковская цепь считается заданной, если известны: матрица вероятностей перехода (переходная матрица) за один шаг ($P = \|p_{ij}\|_{mm}, i$ — строка, j — столбец), а также вектор вероятностей того, что в начальный момент времени процесс пребывает в том или ином состоянии $\bar{p}(0) = \|p_i\|_m$ [4]. МЦ представим [6] и в виде ориентированного взвешенного графа (рис. 1).

Задача вычисления вектора предельных вероятностей $\bar{p}(N)$, при $N \rightarrow \infty$, заданном векторе вероятностей начальных состояний $\bar{p}(0)$ и заданной переходной матрице P , является **прямой задачей анализа МЦ**:

$$\bar{p}(N) = (P^N)^T \bar{p}(0). \quad (1)$$

Для конечного числа шагов N по этой формуле можно с заданной доверительной вероятностью построить прогноз — в каком состоянии будет находиться МЦ на N -м шаге при условии, что в начальный момент времени известны значения вектора начальных вероятностей. Данное прогностическое

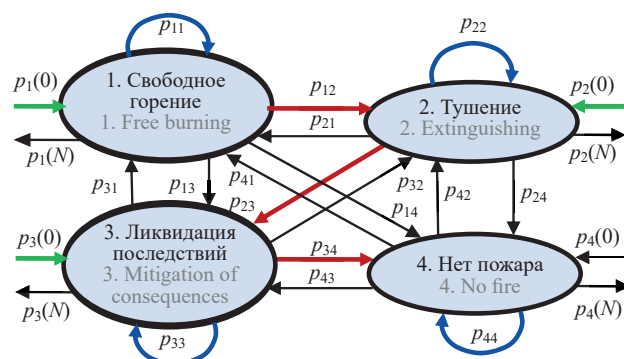


Рис. 1. Графическое представление МЦ, отражающей состояния пожара

Fig. 1. Graphic representation of the Markov chain conveying the state of fire

применение МЦ может быть полезным для обоснования решений, например, принимаемых руководителем тушения пожара (РТП).

Однако для практического применения такой модели развития пожара возникает потребность в адекватных значениях элементов переходной матрицы P , что отражает априорную неопределенность задачи прогнозирования [5]. Знание вектора вероятностей начальных состояний $\bar{p}(0)$ также необходимо, но это обстоятельство не является критическим, так как МЦ обладают свойством слабой зависимости вектора вероятностей предельных состояний $\bar{p}(N)$ от $\bar{p}(0)$ при больших N .

Обратная задача (как обучение МЦ). Воспользоваться технологией рекуррентного оценивания [5, 21] можно, если дополнительно к N наблюдениям (по которым уже имеются оценки $\hat{p}_k$, вектора $\bar{p}$, составленного из столбцов матрицы P , и матрица Q_k — дисперсионная матрица вектора оценок) получено $(N+1)$ -е наблюдение. Следует заметить, что обработка по рекуррентной схеме выполняется не сразу для всех m новых элементов вектора вероятностей состояний, а по каждому $(k$ -му) из них. С учетом этих обстоятельств и, обозначив искомый вектор $\bar{p}$ как вектор оценок $\hat{p}_k$, полученный по последнему элементу N -й выборки, рекуррентные уравнения могут быть представлены в следующем виде [5]:

$$\hat{p}_{k+1} = \hat{p}_k + Q_k \bar{x}_{k+1} (\bar{x}_{k+1}^T Q_k \bar{x}_{k+1} + 1)^{-1} (y_{k+1} - \bar{x}_{k+1}^T \hat{p}_k), \quad (2)$$

$$Q_{k+1} = Q_k - Q_k \bar{x}_{k+1} (\bar{x}_{k+1}^T Q_k \bar{x}_{k+1} + 1)^{-1} \bar{x}_{k+1}^T Q_k, \quad (3)$$

где y_{k+1} — дополнительный $(N+1)$ -й элемент в векторе состояний МЦ $\bar{y}_i(N)$;

$\bar{x}_{k+1} = [x_1(N) \ x_2(N) \ \dots \ x_m(N) \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]^T$ — дополнительная N -я строка в векторно-матричном уравнении измерений, количество нулевых элементов в векторе — $(m-1) \times m$;

T — символ транспонирования. На следующей итерации (все той же $(N+1)$ -й выборки наблюдений) необходимо пересчитать оценки

по формулам (2), (3) для очередного состояния аналогично предыдущему, с той разницей, что y_{k+1} — дополнительный $(N+1)$ -й элемент в векторе $\bar{y}_i(N)$ и т.д.

Пример обучения МЦ иллюстрирует разработанную технологию применения марковских цепей для прогнозирования фаз развития и ликвидации пожара. Для этого были использованы официальные статистические данные о временных характеристиках реагирования ПСП в городах субъектов РФ [20]. Соответствующие гистограммы приведены на рис. 2.

Приведенная гистограмма аппроксимирована гамма-распределением. Параметры плотности данного распределения представлены в табл. 1 [6].

На основе приведенной выше аппроксимации функцией плотности гамма-распределения были построены соответствующие интегральные функ-

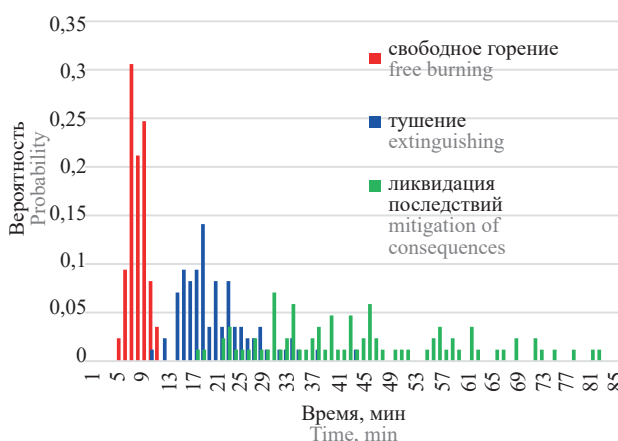


Рис. 2. Гистограммы моментов времени окончания фаз развития пожара

Fig. 2. Histograms demonstrating moments of the fire development phase completion

Таблица 1. Основные параметры плотностей гамма-распределений (пожары в городах РФ в 2016 г.)

Table 1. Principal parameters of gamma distribution densities (fires in the RF cities in 2016)

Выборочные моменты и параметры плотностей гамма-распределения Selective moments and parameters of distribution densities	$t_{св.г}$ $t_{f.b}$	$t_{туш}$ t_{ext}	$t_{л.пос}$ $t_{m.c}$
Выборочное среднее, мин Selective average value, min	8,42	20,51	43,25
Выборочная дисперсия, мин ² Selective dispersion, min ²	1,73	32,86	243,59
Среднеквадратическое отклонение, мин Mean square deviation, min	1,31	5,73	15,61
Параметр формы, α Form parameter, α	41,03	12,80	7,68
Параметр масштаба, β Scale parameter, β	0,21	1,60	5,63

ции распределения $P_{\text{св.г}}(N)$, $P_{\text{туш}}(N)$, $P_{\text{л.пос}}(N)$. Это позволило вычислить вероятности пребывания процесса в каждом из четырех состояний МЦ в некоторый произвольный (текущий) момент времени t (N — его дискретный аналог).

Составляющие вектора состояния $\bar{p}(N)$ МЦ вычисляются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} p_1(N) &= P(t < t_{\text{св.г}}) = 1 - P_{\text{св.г}}(N) \\ p_2(N) &= P(t_{\text{св.г}} < t < t_{\text{туш}}) = P_{\text{св.г}}(N)(1 - P_{\text{туш}}(N)) \\ p_3(N) &= P(t_{\text{туш}} < t < t_{\text{л.пос}}) = P_{\text{туш}}(N)(1 - P_{\text{л.пос}}(N)) \\ p_4(N) &= P(t > t_{\text{л.пос}}) = P_{\text{л.пос}}(N) \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Вычисленные таким образом значения вероятностей пребывания МЦ в том или ином из четырех состояний представлены на рис. 3, а. Они и служат исходными статистическими данными для представленной выше рекуррентной процедуры (2), (3) оценивания элементов переходной матрицы P .

Следует отметить, что гамма-распределение — это непрерывная функция, а МЦ — случайный процесс с дискретным временем. Это обстоятельство позволяет использовать исходную информацию в виде гамма-распределения для построения МЦ с любым шагом дискретизации, необходимым для той или иной задачи моделирования, управления или принятия решений при ликвидации пожара. В данной работе вычисления выполнены для МЦ, имеющих шаг переключения состояний продолжительностью 1, 3, 5, 10 мин. Выбор величины шага зависит от того, через какое время важно знать текущее состояние для того, чтобы на основании этого можно было строить прогноз развития пожара и/или принимать управленческие решения. Вообще говоря, шаг процесса может быть и переменным, определяемым текущей необходимостью, но этот вариант алгоритма в данной работе не рассматривается. Соответствующий конкретный вид матриц

вероятностей перехода МЦ за один шаг следующий (индекс отражает продолжительность шага МЦ в минутах):

$$\begin{aligned} P_1 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,921 & 0,079 & 0 \\ 0 & 0 & 0,959 & 0,041 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_3 &= \begin{bmatrix} 0,696 & 0,304 & 0 & 0 \\ 0 & 0,767 & 0,233 & 0 \\ 0 & 0 & 0,875 & 0,125 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_5 &= \begin{bmatrix} 0,539 & 0,461 & 0 & 0 \\ 0 & 0,624 & 0,376 & 0 \\ 0 & 0 & 0,789 & 0,211 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_{10} &= \begin{bmatrix} 0,141 & 0,859 & 0 & 0 \\ 0 & 0,331 & 0,669 & 0 \\ 0 & 0 & 0,576 & 0,424 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

Следует отметить, что меньшим значениям шага МЦ соответствует большая инерционность процесса, что проявляется в больших (близких к единице) значениях диагональных элементов матрицы перехода, т.е. для таких процессов велика вероятность, что на следующем шаге он останется в том же состоянии и не перейдет в какое-то другое.

На рис. 3, б показана пошаговая динамика изменения вероятностей пребывания МЦ в том или ином состоянии для продолжительности шага в одну минуту (матрица P_1 в (5)) и для вектора вероятностей начальных состояний $\bar{p}(0) = [0 \ 1 \ 0 \ 0]^T$, т.е. имеет место тот случай, когда достоверно (с вероятностью единица) известно, что процесс развития пожара

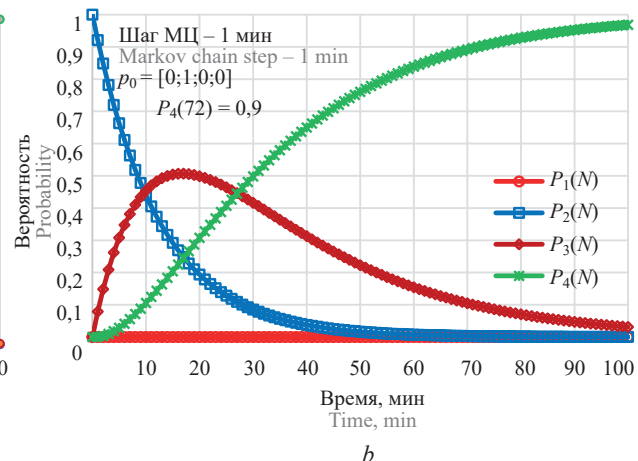
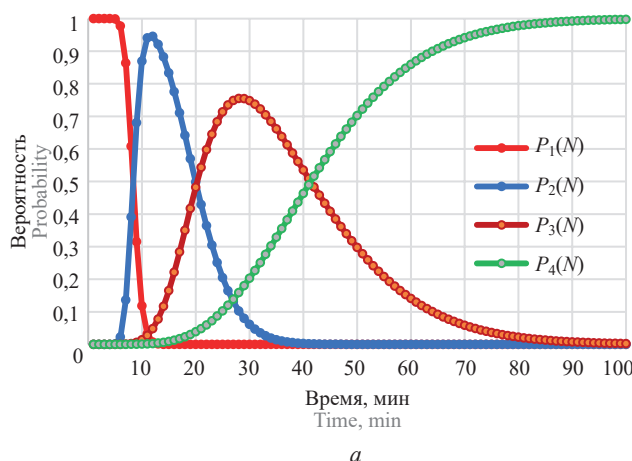


Рис. 3. Вероятности состояний марковской цепи (фаз пожара)

Fig. 3. Probabilities of the Markov chain conditions (fire phases)

находится на фазе тушения, а фаза свободного горения завершена. Тогда по построенным графикам можно заключить, что, например, с доверительной вероятностью 0,9 можно утверждать, что пожар завершится через 72 мин (относительно текущего времени), т.е. перейдет в состояние «Нет пожара» на 72-м шаге.

Построенные на основе статистических данных (см. рис. 2) матрицы переходных вероятностей МЦ могут быть использованы для построения прогноза по формуле (1) для произвольного текущего момента развития процесса пожаротушения. Подобные построения могут быть выполнены как для отдельной ПСП, так и для любой их совокупности (район города, гарнизон, субъект РФ и др.), а также для отдельных групп и типов пожаров, отражая более тонкие различия и особенности тушения пожаров.

Выбор ранга пожара по МЦ и технико-экономическим показателям

Поскольку время продолжительности ликвидации пожара не является конечным и единственным показателем его эффективности, на основе модели МЦ могут быть построены и другие процедуры поддержки выбора решений, в частности, обоснование выбора ранга пожара. Ранг пожара — это один из факторов, влияющих на продолжительность процесса ликвидации пожара, которая, в свою очередь, определяет величину ущерба, нанесенного пожаром.

Рис. 3, б иллюстрирует вероятности состояний МЦ в произвольные дискретные моменты времени для тех или иных значений вектора вероятностей начальных состояний. Поскольку на момент выполнения данных исследований статистические данные о пожарах, дифференцированные по рангам, были недоступны, далее рассмотрены гипотетические данные, близкие к средним данным реагирования по регионам. В частности, синтезированы характеристики матриц вероятностей перехода, моделирующие различные ранги тушения пожаров, которые, по логике применения повышенных рангов, должны улучшать характеристики ликвидации пожара, в том числе сокращая время наступления состояния «Нет пожара», т.е. завершения процесса ликвидации пожара.

В предположении, что по соответствующим статистическим данным и приведенному выше алгоритму машинного обучения МЦ могут быть построены матрицы вероятностей перехода МЦ, были приняты следующие матрицы вероятностей перехода $P_r(N)$, соответствующие рангам $r = 1, 1 \text{ бис}, 2, 3, 4$:

$$\begin{aligned} P_1 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,921 & 0,079 & 0 \\ 0 & 0 & 0,959 & 0,041 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_{1 \text{ бис}} &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,901 & 0,099 & 0 \\ 0 & 0 & 0,949 & 0,051 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_2 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,881 & 0,119 & 0 \\ 0 & 0 & 0,938 & 0,062 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_3 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,862 & 0,138 & 0 \\ 0 & 0 & 0,928 & 0,072 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ P_4 &= \begin{bmatrix} 0,885 & 0,115 & 0 & 0 \\ 0 & 0,842 & 0,158 & 0 \\ 0 & 0 & 0,917 & 0,083 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

По данным матрицам перехода были построены вероятности состояния «Нет пожара» $p_{4,r}(N)$, аналогичные $p_4(N)$ на рис. 3, б, по которым построены дискретные аналоги плотности вероятностей $f_{4,r}(N)$:

$$f_{4,r}(N) = \frac{p_{4,r}(N) - p_{4,r}(N-1)}{\Delta t}, \quad (7)$$

где Δt — величина шага МЦ (для матриц (6) $\Delta t = 1$ мин); для $f_{4,r}(N)$ должно выполняться условие нормировки:

$$\sum_{N=0}^T f_{4,r}(N) = 1, \quad (8)$$

где здесь T — интервал наблюдения (в модельных расчетах $T = 100$ мин).

Вычисленные значения $f_{4,r}(N)$ представляют собой вероятности того, что МЦ будет в состоянии «Нет пожара» в интервале времени от $(N-1)$ до N . Их графики приведены на рис. 4, где одновременно отображены функции потерь для трех видов ущерба как функции времени. Здесь виды ущерба — количество погибших R_2 и травмированных Q_2 людей в 100 пожарах, а также величина прямого материального ущерба u_d от одного пожара (с учетом дефлятора к 2018 г.).

Для выполнения дальнейшего оценивания необходимо выявить зависимость видов ущерба (u_d, R_2, Q_2) от продолжительности пожара. Приведем результаты такого анализа.

Статистические данные из официальных источников [20] и результаты регрессионного анализа приведены в табл. 2.

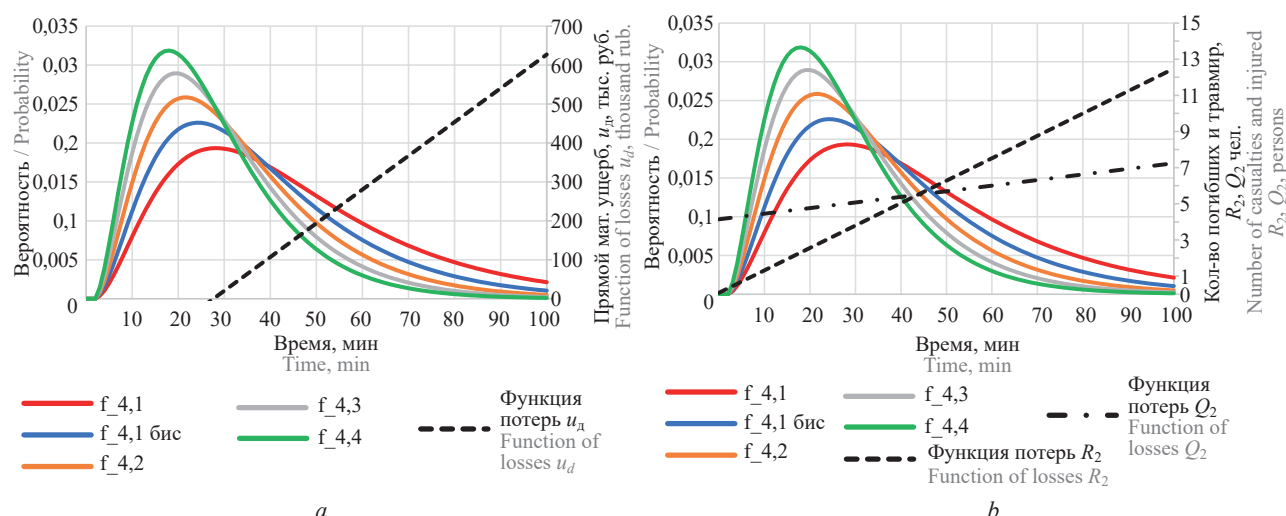


Рис. 4. Плотности вероятностей состояния «нет пожара» и функции потерь для трех видов ущерба (u_d , R_2 , Q_2)

Fig. 4. Densities of probabilities of the “no fire” state and functions of losses for three types of damages (u_d , R_2 , Q_2)

Таблица 2. Статистические данные продолжительности пожаров, видов ущерба в городах РФ и соответствующие параметры уравнений регрессии

Table 2. Statistical data on duration of fires, types of damage to the RF cities and respective parameters of regression equations

Год Year	Продолжительность ликвидации пожара ΔT , мин Fire extinguishing time ΔT , min	Ущерб Damage		
		u_d , тыс. руб. на 1 пожар u_d , thousand rubles per fire	R_2 , чел. на 100 пожаров R_2 , persons per 100 fires	Q_2 , чел. на 100 пожаров Q_2 , persons per 100 fires
2011	50,480	202,066	5,912	8,248
2012	48,350	168,618	5,853	8,423
2013	44,680	141,212	5,597	8,136
2014	46,280	189,002	5,540	8,343
2015	43,630	198,342	5,245	8,196
2016	43,910	91,983	5,232	8,140
2017	44,750	124,281	4,836	8,058
Параметры уравнений парной регрессии Parameters of dual regression equations		c_0	-239,358	0,078
		c_1	8,666	0,117
		R^2	0,281	0,612

Уравнение парной регрессии эффекта (k -го вида ущерба L_k) от времени окончания процесса ликвидации пожара имеет вид:

$$L_k(\Delta T) = c_0 + c_1 \Delta T. \quad (9)$$

Здесь коэффициент детерминации R^2 имеет наибольшее значение для количества погибших, что обусловлено, на наш взгляд, высокой степенью достоверности измерения данного показателя. Данный показатель для других видов ущерба невелик, что, однако, не исключает возможности использования построенных моделей для прогнозирования.

Построенные уравнения регрессии (9) играют роль функции потерь в задачах байесовского оцени-

вания [22]. Эти функции приведены на рис. 4. Байесовские (средние) потери для каждого из рангов r по множеству моментов окончания процесса ликвидации пожара определяются следующим образом:

$$v_{r,k} = \sum_{N=0}^T f_{4,r}(N) L_k(N). \quad (10)$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5 и в табл. 3.

Поскольку в соответствии с законодательством РФ все три вида ущерба возмещаются государством, причем, как показал анализ прецедентов, в среднем за одного погибшего выплачивается возмещение w_k в 1 млн руб., а за одного травмированного —

Таблица 3. Величина возмещаемого ущерба и издержки выезда для рангов пожара

Table 3. Amount of reimbursable damage and costs of response to different ranks of fire

Ущерб Damage	Коэффициент возме- щения w_k , тыс. руб./ед. Reimbursement coefficient w_k , thousand rubles/item	Ранг пожара Fire rank				
		1	1 бис 1 bis	2	3	4
u_d , тыс. руб. на 1 пожар u_d , thousand rubles per fire	1	145,893	109,572	82,260	62,446	48,157
R_2 , чел. на 100 пожаров R_2 , persons per 100 fires	1000	4,966	4,372	3,896	3,524	3,232
Q_2 , чел. на 100 пожаров Q_2 , persons per 100 fires	100	5,460	5,301	5,173	5,072	4,994
Возмещение всего v_r , тыс. руб. на 1 пожар Total reimbursement v_r , thousand rubles per fire		201,016	158,594	126,395	102,759	85,467
Издержки s_r , тыс. руб. на 1 пожар Costs s_r , thousand rubles per fire		6,540	19,337	73,283	105,276	127,883
Сумма, тыс. руб. на 1 пожар Total, thousand rubles per fire		207,556	177,931	199,678	208,034	213,350

100 тыс. руб., то общий ущерб v_r в стоимостном выражении для различных рангов (приведенный в строке «Возмещение всего», см. табл. 3) вычисляется следующим образом:

$$v_r = \sum_{k=1}^3 v_{r,k} w_k. \quad (11)$$

Для текущей корректной оценки переменных издержек (зависящих от количества выездов пожарной техники) необходимо вести мониторинг актуальных цен на расходные материалы. На основании реальных статистических данных выездов нарядов одной из пожарных частей [5] выполнены оценки стоимости расходных материалов (горючее, вода, пена) как переменных затрат. По состоянию на момент исследования (2016–2017 гг.) средние значения (из расчета на один пожар) этих величин были

следующими: горючее — 1564,23 руб.; пена — 1591,32 руб.; вода — 70,8 руб. Однако, учитывая инфляцию и неполноту измерений, эти значения следует учитывать с повышающим коэффициентом (его значение принято 2).

Далее следует вычислить издержки, связанные с выездом пожарной техники по тому или иному рангу. Для обеспечения необходимой степени оперативности реагирования в практике организации работ принято формировать расписание выездов, отражающих количество автотехники, выделяемой по тому или иному рангу пожара. Так, в соответствии с приказом «О введении в действие Расписания выездов подразделений гарнизона пожарной охраны города Москвы для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ» от 18 сентября 2017 г. № 559 по Москве, количественное обеспечение рангов пожаров приведено в табл. 4.

По грубым оценкам, принимая во внимание, что каждый автомобиль потребляет равное количество горючего на каждый выезд (в реальной практике, конечно, эти данные могут быть корректно вычислены по текущей учетной документации), и с учетом принятого повышающего коэффициента были вычислены переменные издержки s_r (на горючее, пену и воду) по рангам выезда (строка «Издержки», см. табл. 3).

Издержки, связанные с выездом по тому или иному рангу, и возмещение от ущерба, нанесенного пожаром, выплачиваются «из одного кармана» — государством.

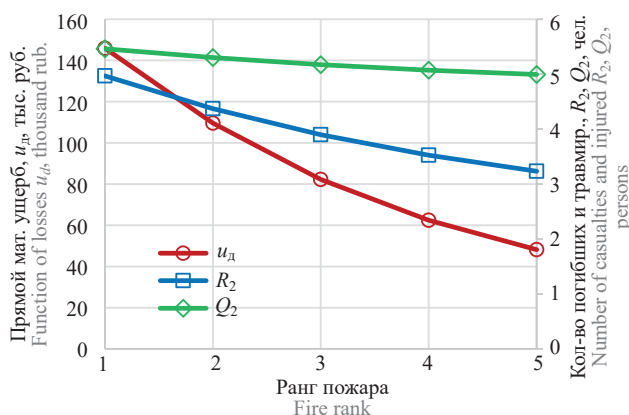


Рис. 5. Зависимости среднего ущерба от ранга пожара

Fig. 5. Dependences between the average damage and the fire

Таблица 4. Количество пожарной техники, участвующей в ликвидации пожаров по Москве, в зависимости от ранга пожара
Table 4. Number of items of fire extinguishing equipment, involved in the fire extinguishing in Moscow depending on the fire rank

Сокращения Abbreviations	Наименование Type of equipment	Ранг пожара Fire rank					
		1	1 бис 1 bis	2	3	4	5
АБГ PGRSV	Автомобиль базы газодымозащитной службы Principal gas rescue service vehicle			1	1	1	1
АЛ FML	Автолестница Fire motor ladder		1	2	3	3	3
АН PE	Автонасос Pumping engine			2	4	6	8
АПМ MFV	Автомобиль пожарный многоцелевой Multipurpose firefighting vehicle			1	1	1	1
АС CLT	Автомобиль связи и освещения Communication and light track			1	1	1	1
АТ RV	Автомобиль тыла Rear vehicle				1	1	1
АЦ TV	Автоцистерна Tank vehicle	2	4	9	14	19	24
ВП FFT	Пожарный автомобиль пенного тушения Foam fire truck			1	1	1	1
ДЗ GRSV	Автомобиль газодымозащитной службы Gas rescue service vehicle		1	2	3	3	3
МС	Автомобиль медицинской службы Medical service vehicle			1	1	1	1
СА	Аварийно-спасательный автомобиль Emergency rescue vehicle			2	2	2	2
Всего Total		2	6	22	32	39	46

С ростом ранга пожара издержки растут, а ущерб снижается. Значит, можно предположить, что существует некоторый компромиссный ранг пожара, при котором сумма издержек и возмещаемого ущерба будет минимальной. Последняя строка в табл. 3 и отражает эту общую сумму. Результаты показывают (рис. 6), что для рассмотренных исходных данных оптимальным является ранг пожара «1 бис» (соответствует цифре «2» на оси «Ранг пожара»).

Графическая иллюстрация отражает полученные результаты выбора оптимального ранга по критерию минимизации суммарных затрат. Хотя, конечно, данное решение является дискуссионным, так как погибших и пострадавших невозможно измерить лишь стоимостью возмещаемого ущерба.

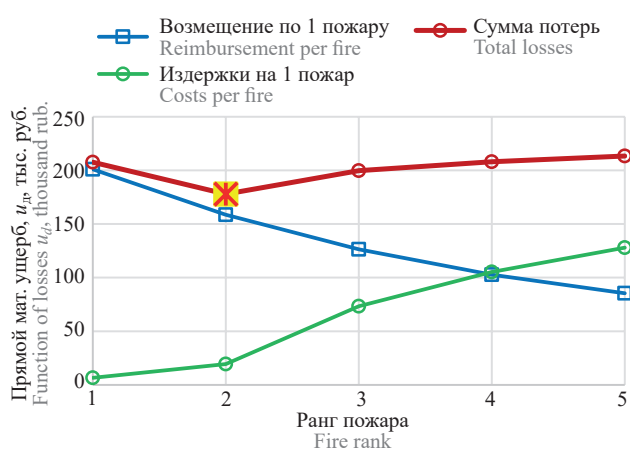


Рис. 6. Зависимости издержек и возмещения ущерба от ранга пожара

Fig. 6. Dependences between costs and damage reimbursement on the fire rank

Выводы

Разработанная машинообучаемая форма марковской цепи, отражающая процесс возникновения и тушения пожара, может использоваться при любом необходимом для целей управления количестве стадий развития пожара. В составе систем поддержки принятия решений подобные модели могут использоваться, в частности, руководителями тушения пожара для оценивания прогнозных значений времени завершения как отдельных стадий, так и пожара в целом. Такая возможность обеспечит более высокую надежность и обоснованность решений, принимаемых при распределении сил и средств на пожаре.

В качестве статистических данных, необходимых для обучения модели, следует использовать те, которые соответствуют управляемому уровню пожарно-спасательного подразделения (отдельная конкретная ПСЧ, локальная группа ПСЧ, гарнизон, субъект

РФ и т.п.). В этих случаях построенная марковская модель будет наиболее адекватно представлять именно данный уровень, для которого построенные по модели прогнозы будут максимально точными. Такая персонализация позволяет еще более детализировать модели, например, для различных типов объектов пожара.

Приведенный алгоритм выбора оптимального ранга пожара на основе использования машинообученной марковской цепи базируется на привлечении дополнительных технико-экономических оценок процесса обеспечения пожарной безопасности, что требует создания дополнительной системы мониторинга таких показателей. Хотя, следует отметить, что данное решение является дискуссионным, так как погибших и пострадавших невозможно измерить лишь стоимостью возмещаемого ущерба, а значит, предложенный алгоритм, по-видимому, следует дополнить и иными критериями.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Брушлинский Н.Н., Кленко Е.А., Попков С.Ю., Соколов С.В. Управление пожарной безопасностью субъектов Российской Федерации на основе анализа пожарных рисков // Проблемы пожарной безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2010. № 3. С. 104–114.
2. Собянин С.С. Московское правительство о пожарной безопасности в столице в 2018–2019 гг. // Каталог «Пожарная безопасность». 2019. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/moskovskoe-pravitelstvo-o-pozharnoy-bezopasnosti-v-stolitse-v> (дата обращения: 14.12.2021).
3. Пожарные риски: динамика, управление, прогнозирование / под ред. Н.Н. Брушлинского, Ю.Н. Шебеко. М. : ВНИИПО, 2007. 370 с.
4. Taha H.A. Operations research: An introduction. 10th Global ed. Harlow (England): Pearson Education Limited, 2017. 848 p.
5. Топольский Н.Г., Вилисов В.Я. Методы, модели и алгоритмы в системах безопасности: машинное обучение, робототехника, страхование, риски, контроль. М. : РИОР, 2021. 475 с.
6. Вилисов В.Я. Применение марковских цепей для моделирования и прогнозирования развития пожара // Инженерный вестник Дона. 2021. № 3. URL: <http://www.ivdon.ru/rumagazine/archive/n3y2021/6881> (дата обращения 14.12.2021).
7. Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я. Информационно-аналитические модели поддержки управления при ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций. М. : АГПС МЧС России, 2021. 216 с.
8. Lee H.-R., Lee T. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response // European Journal of Operational Research. 2021. Vol. 291. Issue 1. Pp. 296–308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018.
9. Бедило М.В., Бутузов С.Ю., Прус Ю.В., Рыженко А.А., Чурсин Р.Г. Модель адаптивного управления оперативными службами РСЧС в чрезвычайных ситуациях межрегионального и федерального уровня // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 1 (71).
10. Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M. Breath activity detection algorithm. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.07767> (дата обращения: 14.12.2021).
11. Zhang X., Mahadevan S. Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment // Decision Support Systems. 2020. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113246 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300014> (дата обращения: 14.12.2021).
12. Овсяник А.И., Копнышев С.Л., Бурков В.Н., Щепкин А.В. О методике исследования достаточности мероприятий по обеспечению безопасности функционирования региона страны // Технологии техносферной безопасности. 2017. № 2 (72). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/39-02-17.ttb.pdf> (дата обращения: 14.12.2021).

13. Ларичев О.И., Мошковиц Е.М. О возможностях получения от человека непротиворечивых оценок многомерных альтернатив // Дескриптивный подход к изучению процессов принятия решений при многих критериях : сб. тр. М. : ВНИИСИ, 1980. Вып. 9. С. 3–26.
14. Петровский А.Б. Теория принятия решений. М. : Академия, 2009. 400 с.
15. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time // Decision Support Systems. 2020. Vol. 133. P. 113260. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
16. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. 2019. Vol. 127. P. 113145. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113145
17. Trekin A., Novikov G., Potapov G. etc. Satellite imagery analysis for operational damage assessment in Emergency situations // Cornell University Library, NY, USA URL: arxiv.org/pdf/1803.00397.pdf (дата обращения: 14.12.2021).
18. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time // Decision Support Systems. 2020. Vol. 133. P. 113260. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154) (дата обращения: 14.12.2021).
19. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities // Decision Support Systems. 2019. Vol. 127. P. 113145. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745) (дата обращения: 14.12.2021).
20. Пожары и пожарная безопасность в 2016 г. // Статистический сборник. М. : ФГУ ВНИИПО, 2017. 124 с.
21. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. М. : Мир, 1980. 456 с.
22. Де Гроот М.М. Оптимальные статистические решения. М. : Мир, 1974. 492 с.
23. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1605.02561> (дата обращения: 14.12.2021).

REFERENCES

1. Brushlinskiy N.N., Klepko Ye.A., Popkov S.Yu., Sokolov S.V. Fire safety management of subjects of the russian federation on the basis of fire hazard analysis. *Problemy pozharnoy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy/Fire safety and emergency problems*. 2010; 3:104-114. (rus).
2. Sobyenin S.S. Moscow government on fire safety in the capital in 2018-2019. *Katalog "Pozharnaya bezopasnost"/Fire safety catalog*. 2019. URL: <http://lib.secuteck.ru/articles2/firesec/moskovskoe-pravitelstvo-o-pozharnoy-bezopasnosti-v-stolitse-v> (Accessed: December 14, 2021). (rus).
3. *Fire risks: dynamics, management, forecasting*. N.N. Brushlinsky, Yu.N. Shebeko (ed.). Moscow, VNIPO, 2007; 370. (rus).
4. Taha H.A. *Operations research: An introduction*. 10th Global ed. Harlow (England), Pearson Education Limited, 2017; 848.
5. Topol'skij N.G., Vilisov V.Ya. *Methods, models and algorithms in security systems: machine learning, robotics, insurance, risks, control*. Moscow, RIOR Publ., 2021; 475. (rus).
6. Vilisov V.Ya. Application of Markov chains for modeling and forecasting the development of a fire. *Engineering journal of Don*. 2021; 3. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6881> (Accessed: December 14, 2021). (rus).
7. Topol'skij N.G., Butuzov S.Yu., Vilisov V.Ya. *Information and analytical models of management support in the elimination of fires and emergencies*. Moscow, State Fire Service Academy EMERCOM of Russia, 2021; 216. (rus).
8. Lee H.-R., Lee T. Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response. *European Journal of Operational Research*. 2021; 291(1):296-308. DOI: 10.1016/j.ejor.2020.09.018
9. Bedilo M.V., Butuzov S.Yu., Prus Yu.V., Ryzhenko A.A., Chursin R.G. Model of adaptive management of emergency services of the RSChS in emergency situations at the interregional and federal levels. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti/Technology of Technosphere Safety*. 2017; 1(71). (rus).
10. Hamke E.E., Jordan R., Ramon-Martinez M. *Breath activity detection algorithm*. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1602.07767> (Accessed: December 14, 2021).

11. Zhang X., Mahadevan S. Mahadevan Bayesian neural networks for flight trajectory prediction and safety assessment. *Decision Support Systems*. 2020; 131. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113246 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300014> (Accessed: December 14, 2021).
12. Ovsyanik A.I., Kopnyshev S.L., Burkov V.N., Shchepkin A.V. The research methodology of sufficiency measures to ensure the safety functioning of the region. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti/Technology of Technosphere Safety*. 2017; 2(72). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-2/39-02-17.ttb.pdf> (Accessed: December 14, 2021). (rus).
13. Larichev O.I., Moshkovich Ye.M. On the possibilities of obtaining from a person consistent estimates of multidimensional alternatives. *Deskriptivnyy podkhod k izucheniyu protsessov prinyatiya resheniy pri mnogikh kriteriyakh/Descriptive approach to the study of decision-making processes under many criteria*. Moscow, VNIISI, 1980; 9:3-26. (rus).
14. Petrovskiy A.B. *Decision theory*. Moscow, Akademiya Publ., 2009; 400. (rus).
15. Fertier A., Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time. *Decision Support Systems*. 2020; 133:113260. DOI: 10.1016/j.dss.2020.113260
16. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities. *Decision Support Systems*. 2019; 127:113145. DOI: 10.1016/j.dss.2019.113145
17. Trekin A., Novikov G., Potapov G. etc. Satellite imagery analysis for operational damage assessment in Emergency situations. *Cornell University Library*. NY. USA. URL: arxiv.org/pdf/1803.00397.pdf (Accessed: December 14, 2021).
18. Fertier A. Barthe-Delanoë A.-M., Montarnal A., Truptil S., Bénaben F. A new emergency decision support system: the automatic interpretation and contextualisation of events to model a crisis situation in real-time. *Decision Support Systems*. 2020; 133:113260. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923620300154) (Accessed: December 14, 2021).
19. Cavdur F., Sebatli A. A decision support tool for allocating temporary-disaster-response facilities. *Decision Support Systems*. 2019; 127:113145. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167923619301745) (Accessed: December 14, 2021).
20. *Fires and fire safety in 2016. Statistical collection*. Moscow, FGU VNIPO, 2017; 124. (rus).
21. *Linear Regression Analysis*. Moscow, Mir Publ., 1980; 456. (rus).
22. De Groot M. *Optimal statistical solutions*. Moscow, Mir Publ., 1974; 492. (rus).
23. Stroh R., Bect J., Demeyer S., Fischer N., Vazquez E. *Vazquez Gaussian process modeling for stochastic multi-fidelity simulators, with application to fire safety*. 2016. URL: <https://arxiv.org/abs/1605.02561> (Accessed: December 14, 2021).

Поступила 08.11.2021, после доработки 19.11.2021;

принята к публикации 01.12.2021

Received November 8, 2021; Received in revised form November 19, 2021;

Accepted December 1, 2021

Информация об авторах

ТОПОЛЬСКИЙ Николай Григорьевич, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; профессор кафедры информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764; e-mail: ntopolskii@mail.ru

ВИЛИСОВ Валерий Яковлевич, д-р экон. наук, канд. техн. наук, профессор кафедры математики и естественнонаучных дисциплин, Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова, Россия, 141074, Московская обл., г. Королев, ул. Гагарина, 42; РИНЦ ID: 521423; Scopus Author ID: 57205441277; ResearcherID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593; e-mail: vvib@yandex.ru

Information about the authors

Nikolay G. TOPOLSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Professor of Department of Information Technology, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 114882; ORCID: 0000-0002-0921-4764, e-mail: ntopolskii@mail.ru

Valeriy Ya. VILISOV, Dr. Sci. (Econom.), Cand. Sci. (Eng.), Professor of Department of Mathematics and Natural Sciences, Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, Pilot-Cosmonaut A.A. Leonov, Gagarina St., 42, Moscow Region, Korolev, 141074, Russian Federation; ID RISC: 521423; Scopus Author ID: 57205441277; ResearcherID: P-1650-2019; ORCID: 0000-0002-2612-8593; e-mail: vvib@yandex.ru

ХАБИБУЛИН Ренат Шамильевич, канд. техн. наук, доцент, начальник Учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ Author ID: 637284; Scopus Author ID: 6506192400; Researcher ID: A-4261-2016; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

ПРАНОВ Борис Михайлович, доктор техн. наук, профессор, профессор кафедры прикладных информационных технологий, Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Россия, 119571, г. Москва, проспект Вернадского, 82, стр.1; РИНЦ ID: 786906; ORCID: 0000-0003-2104-3897; e-mail: boris.pranov@gmail.com

ДЕМЕХИН Феликс Владимирович, д-р техн. наук, председатель, Региональная общественная организация содействия развитию деятельности в сфере пожарной безопасности «Коллегия пожарных экспертов», Россия, 196006, г. Санкт-Петербург, Заставская ул., д. 31, корп. 1 литер Р, этаж/комн 2/23; e-mail: demehin@yandex.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Renat Sh. KHABIBULIN, Cand. Sci. (Eng.), Docent; Head of the Educational and Scientific Complex of Automated Systems and Information Technologies, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 637284; Scopus Author ID: 6506192400; ResearcherID: A-4261-2016; ORCID: 0000-0003-1816-1665; e-mail: kh-r@yandex.ru

Boris M. PRANOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Applied Information Technologies, Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation, Prospekt Vernadskogo, 82, p.1, Moscow, 119571, Russian Federation; ID RISC: 786906; ORCID: 0000-0003-2104-3897; e-mail: boris.pranov@gmail.com

Felix V. DEMEKHIN, Dr. Sci. (Eng.), chairman, Panel of Fire Experts Regional Public Organization for Promoting Fire Safety Assurance Activities, floor/room 2/23, letter P, bldg. 1, 31, Zastavskaya st., St. Petersburg, 196006, Russian Federation; e-mail: demehin@yandex.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 52–60

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):52-60

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 614.835.3

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.52-60>

Особенности оценки уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров перед проведением огневых работ

Владимир Петрович Назаров¹, Дмитрий Александрович Корольченко^{2✉},
Сергей Александрович Швырков¹, Мухаммед Муратович Тангиев¹,
Анатолий Павлович Петров¹

¹ Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из важнейших этапов в разработке требований пожаровзрывобезопасности при проектировании и эксплуатации объектов хранения нефти и нефтепродуктов является корректная экспертиза фактов пожаров и взрывов. К сожалению, электронные ресурсы не всегда правильно раскрывают причины пожаров и не позволяют сделать правильные оценки уровня пожаровзрывобезопасности.

Цели и задачи. Повышение качества оценки статистических данных о пожарах на резервуарах на основе использования данных из разных источников информации. Формирование квалификационных признаков причин пожаров позволит упростить процедуру экспертизы пожаров.

Методы. Анализ статистических данных о пожарах на объектах хранения, транспортировки и переработки углеводородов. Расчетно-аналитическая оценка опасности формирования горючих концентраций в газовом пространстве резервуаров и формирование взрывоопасных зон снаружи технологических аппаратов.

Результаты и их обсуждение. В статье рассматриваются особенности оценки уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров на основе классификации причин пожаров, происходящих на стадии предремонтной подготовки резервуаров и проведения огневых работ. Сформированы три основных классификационных признака: пожары, возникающие при выполнении технологических операций по предремонтной подготовке; пожары, возникающие после выполнения нормативных требований по предремонтной подготовке, и пожары, связанные с грубейшими нарушениями требований пожарной безопасности.

Выводы. В целях предотвращения пожаров должны тщательно прорабатываться вопросы проектирования резервуарных парков, соблюдаться меры пожарной безопасности при эксплуатации объектов хранения углеводородов, осуществляться поддержание исправности оборудования, проводиться профилактические работы.

Ключевые слова: резервуарный парк; пожар; нефтепродукт; предремонтная подготовка; очистка; дегазация; огневые работы; источник зажигания; горючая среда

Для цитирования: Назаров В.П., Корольченко Д.А., Швырков С.А., Тангиев М.М., Петров А.П. Особенности оценки уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров перед проведением огневых работ // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 52–60. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.52-60

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Features of assessing the level of fire and explosion safety of tanks before hot works

Vladimir P. Nazarov¹, Dmitriy A. Korolchenko^{2✉}, Sergey A. Shvyrkov¹,
Mukhammed M. Tangiev¹, Anatoliy P. Petrov¹

¹ The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the most important stages in the development of fire and explosion safety requirements applicable to the process of design and operation of oil and petroleum products storage facilities is the correct examination of the facts of fires and explosions. Unfortunately, electronic resources don't always correctly disclose the causes of fires and don't allow for the correct assessments of the fire safety level.

Goals and objectives. The goal of the study is to improve the quality of evaluation of statistical data on fires arising in reservoirs, based on the use of data from various information sources. The compilation of qualification attributes of causes of fires will simplify the fire examination procedure.

Methods. Research methods include the analysis of statistical data on fires at hydrocarbon storage, transportation and processing facilities. The work encompasses the computational and analytical assessment of the possibility of formation of combustible concentrations in the gas space of tanks and formation of explosive zones outside technological devices.

Results and their discussion. The article addresses features of assessing the fire and explosion safety of tanks by classifying causes of fires at the stage of pre-repair preparation of tanks and hot works. Three principal classification features have been identified: fires that occur during the pre-repair preparation; fires that occur after the fulfillment of regulatory requirements for the pre-repair preparation, and fires caused by major violations of fire safety requirements.

Conclusions. To prevent fires, the issue of tank farm design should be elaborated in detail, fire safety measures should be taken during the operation of hydrocarbon storage facilities, maintenance of equipment should be carried out, preventive maintenance should be executed, as well.

Keywords: tank farm; fire; oil product; pre-repair preparation; cleaning; degassing; hot works; ignition source; combustible environment

For citation: Nazarov V.P., Korolchenko D.A., Shvyrkov S.A., Tangiev M.M., Petrov A.P. Features of assessing the level of fire and explosion safety of tanks before hot works. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):52-60. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.52-60 (rus).

✉ *Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko*, e-mail: KorolchenkoDA@mgisu.ru

Введение

Резервуарные парки являются объектами с повышенным уровнем пожаровзрывобезопасности, так как пожар, происходящий в резервуаре, приводит к значительному материальному ущербу и к человеческим жертвам.

Проблема пожарной безопасности объектов нефтегазового комплекса актуальна не только на территории Российской Федерации, но и за рубежом. В ряде научных работ приведен анализ пожаров на резервуарах, произошедших за рубежом. Согласно этим работам, в период с 1950 по 2004 годы произошло около 500 пожаров на резервуарах [1–3]. Отмечается, что происходит незначительное увеличение количества аварий в рассматриваемый период. Данное явление позволяет сделать вывод о том, что это может быть связано не только с развитием нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, но и с отсутствием достоверной информации о реальном количестве произошедших аварий в данный отрезок времени.

В 1980-х годах сотрудниками ВИПТШ МВД СССР Волковым О.М., Сучковым В.П., Швырковым А.Н., Назаровым В.П. был проведен анализ статистики пожаров в системе Госкомнефтепродукта РСФСР. В основу анализа были взяты данные ГУПО МВД СССР, данные журнального учета в центральном аппарате и региональных подразделений Госкомнефтепродукта РСФСР, а также результаты опроса специалистов на местах. Результаты исследований показали, что результаты журнального учета на местах и данные официальной статистики отличаются в несколько раз, а результаты опроса специалистов, например, по опасным событиям при подготовке к ремонту технологического оборудования и проведении огневых работ — в 10 раз. Специ-

алисты на местах давали информацию о том, что факты опасных событий не передавались в вышестоящие инстанции, если не было травматизма персонала.

Современный стиль отчетности тоже имеет недостатки. Так, по данным ВНИИПО на объектах НК «Лукойл» не было случаев гибели персонала, тем не менее известно, что 5 октября 2017 г. в г. Кстово произошел взрыв на РВСП-10000 при проведении реконструкции системы пенного пожаротушения с гибелью четырех рабочих. Аналогичная ситуация сложилась и в учете пожаров в системе АК «Транснефть». Данные опубликованной статистики ВНИИПО МЧС РФ не соответствуют реальным фактам пожаров, так, в 2019 г. не учтены факты двух пожаров при проведении предремонтной подготовки резервуаров^{1, 2}.

Указанная выше ситуация с обработкой статистических данных и исследованием пожаров не способствует адекватной оценке уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров. Поэтому целесообразно обсудить конкретные факты и причины пожаров на резервуарах, которыми являются: самовозгорания пирофорных соединений — 11,6 % (из этого числа на НПЗ — 62,5 %, на промыслах — 37,5 %), разряды атмосферного электричества — 5,8 %, разряды статического электричества — 8,7 %, искры от ударов, возникающих при отборе проб, — 2,9 %. Согласно имеющимся данным, наибольшая доля аварийных ситуаций была связана с предремонтной подготовкой (34,7 %) и проведением огневых работ [2].

¹ Новости дня в России и мире. РБК. URL: [https://www.rbc.ru/rbc_freenews/5de8176b9a7947b3e8e1b061\(03.02.2020\)](https://www.rbc.ru/rbc_freenews/5de8176b9a7947b3e8e1b061(03.02.2020))

² Новостной портал «Нижегород онлайн». URL: <https://www.nn.ru/news/articles/51321851>

Цель настоящего исследования: оценка статистических данных о пожарах на резервуарах на основе использования разных источников информации. Формирование квалификационных признаков причин пожаров позволит упростить процедуру экспертизы пожаров.

Аналитический обзор и аналитическая оценка результатов исследования

4 декабря 2019 г. на нефтеперекачивающей станции (НПС) «Калейкино» в резервуаре объемом 20 000 м³ произошел взрыв, а затем начался пожар. В результате погибли два человека, которые проводили работы по зачистке резервуара. Причиной пожара стало возгорание паровоздушной смеси. Такой подход к оценке причинно-следственных связей не является достаточно профессиональным, так как любой взрыв (пожар) связан с возгоранием паровоздушной смеси. В этой оценке причины формирования горючих концентраций не раскрыты, а источники зажигания не указаны.

В г. Кстово Нижегородской области 5 октября 2017 г. в 14.10 на заводе «Лукойл» в ходе ремонтных работ на бензиновом резервуаре, проводимых подрядными организациями, произошло возгорание, а затем взрыв. Причина инцидента — нарушение

правил пожаровзрывобезопасности при проведении регламентных работ на резервуаре. Из-за аварии погибло четыре человека. Данные приведенного электронного ресурса противоречивы, так как на видео съемке зафиксирован сначала взрыв, а затем пожар, а не возгорание и затем взрыв.

31 мая 2005 г. в Варффюме, Нидерланды, при осуществлении сварочных работ внутри закрытого резервуара с остатками нефтепродуктов произошел взрыв. В результате двое рабочих погибли. Третий был госпитализирован в тяжелом состоянии в больницу [4]. Из этих сведений нельзя сделать вывод, проводился ли предварительный газовый анализ, если да, то какими приборами. Какие предварительные технологические операции по предремонтной подготовке резервуара были проведены перед огневыми работами.

Приведенная выше информация не раскрывает фактических причин пожаров и искажает законы и закономерности возникновения и развития пожаров. Поэтому рассмотрим более детально взрывы и пожары, произошедшие при проведении предремонтной подготовки и огневых работ, которые можно классифицировать на несколько основных групп:

1) возникшие при очистке резервуара от остатков нефтепродуктов в период проведения технологи-



Рис. 1. Взрыв на РВСП-10000 в г. Кстово

Fig. 1. An explosion of an RVSP-10000 oil tank, Kstovo

ческих операций по очистке резервуаров — 29,2 %, что свидетельствует о высоком уровне пожаро-взрывоопасности технологий предремонтной подготовки резервуаров;

2) произошедшие непосредственно при проведении ремонтных работ, в том числе огневых работ на резервуарах, которые были предварительно очищены, — 50,0 %. Учитывая такое большое количество аварийных ситуаций, произошедших по данной причине, необходимо анализировать и перерабатывать нормативно-техническую документацию, регламентирующую порядок проведения, технологию и пожаровзрывобезопасность очистных работ. Также это указывает на отсутствие безопасной и качественной техники и технологии по предремонтной подготовке;

3) возникшие при проведении огневых ремонтных работ на резервуарах при их обслуживании, но без предварительной очистки резервуаров от остатков нефтепродуктов, — 20,8 %. Такое количество скорее всего свидетельствует о низком уровне профессиональной подготовки и квалификации обслуживающего персонала, а также о необходимости разработки способов обеспечения пожаро-взрывобезопасности при проведении ремонтных работ на резервуарах без их предварительной очистки (рис. 1, 2) [1].

Характерным примером пожаров, произошедших при грубейших нарушениях требований нормативных документов, является пожар на РВСП-10000, происшедший в г. Кстово 5 октября 2017 г. на ООО «ЛУКОЙЛ- НЕФТЕОРГСИНТЕЗ».

По результатам проведенного статистического анализа Исследовательским центром экспертизы

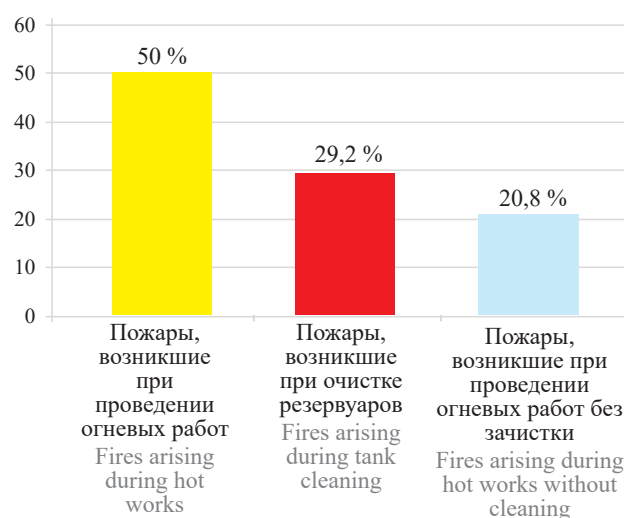


Рис. 2. Гистограмма статистических данных о пожарах в резервуарах, относящихся к предремонтной подготовке

Fig. 2. The hystogram of statistical data on tank fires related to pre-repair preparations

пожаров Чешко И.Д. и Петровой Н.В. установлено, что в период с 2010 г. по 2015 г. на территории резервуарных парков произошло 30,75 % пожаров, на резервуарах для хранения нефтепродуктов — 15 %, на автомобильных цистернах для перевозки нефтепродуктов — 6,25 %, на автозаправочных станциях — 11 %. Также на резервуарах для хранения нефтепродуктов, расположенных на территории промышленных предприятий — 2,5 %, на нефтепроводах, расположенных на территории нефтебаз, — 2,5 %, в железнодорожных цистернах для перевозки нефтепродуктов на нефтебазе — 2,5 %, складах горюче-смазочных материалов — 2,5 %. Данный анализ проводился на основании данных, полученных из 27 государственных судебно-экспертных учреждений федеральной противопожарной службы «Испытательная пожарная лаборатория» (СЭУ ФПС «ИПЛ»). В этих учреждениях запрашивались данные о пожарах, по которым в период 2010–2015 гг. работала лаборатория, и были подготовлены технические заключения или судебные экспертизы (рис. 3) [5]. Статистика свидетельствует, что 54 % происходит в резервуарах для хранения бензина, 32 % — в резервуарах для хранения сырой нефти, 14 % — в резервуарах, которые используются для хранения других видов нефтепродуктов [5–7].

Согласно проведенному анализу статистики о пожарах на объектах хранения и переработки нефтепродуктов, можно сделать вывод о том, что огневые и ремонтные работы зачастую являются причинами пожаров. В процессе их проведения могут возникать технологические источники зажигания, образующиеся при осуществлении резательных, сварочных, огневых работ.

Стоит отметить, что катастрофический отказ резервуара может возникнуть при взрыве легковоспламеняющихся паров. Характерным примером является авария 1986 г. в Салониках, произошедшая в ходе проведения резательных работ с образованием искр, воспламенивших горючие пары, что привело к распространению огня на другие районы. Пожар длился семь дней, результатом чего стало уничтожение 10 из 12 резервуаров для хранения сырой нефти и 5 погибших [8].

Выбор способа подготовки резервуара к ремонтным работам зависит от типа резервуара, его вместимости, количества отложений и т.д. Эта работа опасна и трудоемка, поэтому требует качественной предварительной оценки опасности, которая включает в себя анализ паровоздушной среды в зоне работ, вид нефтепродукта, с которым необходимо работать, также необходимо учитывать климатические условия, в которых находится резервуарный парк и состояние целостности резервуара. Эти и другие факторы в значительной степени оказыва-



Рис. 3. Гистограмма статистических данных о пожарах в период 2010–2015 гг.

Fig. 3. The histogram of statistical data on fires in 2010–2015

ют влияние на выбор метода подготовки резервуара к ремонту [1, 9, 10].

Наиболее распространенными технологическими операциями по предремонтной подготовке являются смыв остатков нефтепродукта, откачка нефтешлама, отделение нефтепродукта, его закачка в емкости, дегазация резервуаров с применением естественной и принудительной напорной вентиляции, зачистка внутренних поверхностей, сбор отходов [11].

Резервуары часто содержат остатки легковоспламеняющихся материалов, даже небольшое количество которых может привести к воспламенению и взрывоопасным концентрациям. Это особенно опасно при проведении огневых работ, в том числе газовой сварки, или с применением средств, генерирующих источник зажигания, таких как шлифовальные машины [9].

Опасность возникновения пожара существует при очистке резервуара. В результате того, что нарушаются условия нормального режима работы оборудования, возникает возможность для проникновения воздуха внутрь оборудования и его контакта с горючим, вследствие чего образуется взрывоопасная концентрация, которая представляет пожарную

опасность. Источниками зажигания здесь могут также быть фрикционные искры, искры от электрооборудования, выхлопные газы от используемой техники.

Несмотря на пожароопасность данного процесса, он необходим для поддержания резервуаров в нормальных условиях эксплуатации и хорошем техническом состоянии. В течение длительной эксплуатации резервуара на днище резервуара образуется технологический осадок нефтепродукта. Со временем он уплотняется, что ведет к снижению полезной емкости резервуара. Кроме этого, из-за осадка существует риск не выявить своевременно коррозию в днище, способную привести к его прорыву. Чтобы этого не случилось, необходимо систематически проводить очистку резервуаров [12].

Для этого могут использоваться различные способы. Одними из распространенных способов очистки днища и стенок резервуара от отложений нефтепродуктов являются системы гидравлического размыва и винтовые мешалки [10]. Однако опасность данного способа заключается в том, что при его применении происходит разгерметизация резервуара, а также существует вероятность утечки в случае потери герметичности сальниковых уплотнений. Следовательно, известные методы очистки от отложений недостаточно безупречны и совершенны. Поэтому поиск качественных способов очистки резервуаров является актуальной задачей.

Перед очисткой резервуара важен анализ его остатков, чтобы определить их химический состав [13].

Кроме этого, пожар способны вызвать разряды атмосферного электричества, к которым также относятся пожары, возникающие от ударов молний в резервуары, и огневые технологические установки.

Аварии, связанные с ударом молний и последующим взрывом паров нефти и газа, происходили множество раз. Например, в августе 1989 г. в г. Циндао произошел пожар в резервуаре, в результате которого 19 человек погибли и более 100 человек получили ранения, также был понесен непосредственный экономический ущерб 35,4 млн юаней [14].

Большую опасность представляют собой зоны со взрывоопасной концентрацией, которая образуется в результате загазованности воздуха парами горючих жидкостей. Повышенное содержание паров возникает при заполнении резервуаров, при перекачке нефтепродуктов. Здесь источниками зажигания могут быть автомобили, искры от электрооборудования, открытый огонь, курение и др. [15].

Характерным примером является пожар, распространившийся на другие территории и произошедший 22 июня 1996 г. в ходе перекачки нефти рабочим. Данные исследования показали, что рас-

стояние от трубы до дна резервуара составило 1,9 м, вследствие чего был накоплен огромный электростатический заряд от ударов брызг нефти, в результате которого произошло воспламенение горючих паров [16].

В связи с тем, что ремонтные работы происходят в условиях повышенной пожароопасности и часто являются причиной возникновения пожаров, их проведение должно быть предопределено разработкой методологии на основании исследований статистических данных о пожарах.

Следует отметить, что механизированные способы очистки имеют ряд преимуществ перед ручными с помощью рабочего персонала. Конечно, зачастую заказчик делает выбор в пользу более низкой стоимости проведения работ, но их качество в данных случаях снижается, а возникновение аварий при проведении огневых работ напрямую зависит от качества очистки, что также подтверждают случаи, описанные выше. В таких случаях экономический ущерб от пожара может превышать 200 млн рублей, что делает целесообразным применять именно механизированные методы и способы очистки с помощью мобильных очистных комплексов и допускать к работам только высококвалифицированный рабочий персонал [17–19].

В целях предотвращения пожаров должны тщательно прорабатываться вопросы проектирования резервуарных парков, соблюдаться меры пожарной безопасности, поддерживаться исправность оборудования, проводиться профилактические работы. Важно соблюдать меры по смягчению последствий и минимизации масштабов аварий. Системы без-

опасности должны обеспечивать соблюдение основных требований к резервуарным паркам [20–22]. Однако, несмотря на принимаемые меры, число пожаров практически не изменяется

Пожары, происходящие в резервуарах, как правило, начинаются со взрыва, в результате чего автоматические установки пожаротушения выходят из строя. После повреждения пеногенерирующей аппаратуры пожар практически невозможно потушить автоматическими установками пожаротушения. Подобные случаи приводят к значительным материальным ущербам.

Выводы

Из вышесказанного следует, что возникновение пожара в резервуаре связано с наличием источников зажигания, пожароопасными свойствами нефтепродуктов, конструктивных особенностей резервуаров, наличия в газовом пространстве взрывоопасных концентраций. Анализ пожаров и аварийных ситуаций за последние несколько лет показывает, что в основном пожары и взрывы возникают, согласно результатам исследований статистики, на наземных резервуарах, причем значительная часть из них происходит в результате некачественной предремонтной подготовки. В связи с этим необходимо совершенствовать нормативную базу, связанную с хранением, технологическими операциями, проводимыми на объектах хранения нефтепродуктов, а также при подготовке резервуаров к ремонту применять современные механизированные мобильные очистные комплексы и привлекать для организации работ высококвалифицированный персонал.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Волков О.М., Назаров В.П. Пожарная безопасность при очистке и ремонте крупных резервуаров и танкеров. М. : ВНИИОЭНГ, 1979. 40 с.
2. Persson H., Lönnemark A. Tank fires-Review of fire incidents 1951–2003 // Brandforsk Project. 2004.
3. Назаров В.П. Проблемы и методы обеспечения пожаровзрывобезопасности предприятий нефтегазового комплекса // Вестник Академии ГПС МЧС России. 2005. № 4.
4. Knegtering B., Pasmaanb H.J. Safety of the process industries in the 21st century: A changing need of process safety management for a changing industry // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2009. Vol. 22. No. 2. Pp. 162–168. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.11.005
5. Петрова Н.В., Чешко И.Д. Анализ экспертной практики по исследованию пожаров, произошедших на объектах хранения нефти и нефтепродуктов // Проблемы и перспективы судебной пожарно-технической экспертизы : материалы Междунар. науч.-практ. конф. СПб. : С.-Петербург. ун-т ГПС МЧС России. 2015. С. 78–81.
6. Петрова Н.В., Чешко И.Д. Установление причинно-следственных связей нарушений требований пожарной безопасности при чрезвычайной ситуации (пожаре) на объектах хранения нефтепродуктов // Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России. 2018. № 1. С. 42–49.

7. Петрова Н.В., Чешко И.Д., Шаранов С.В., Лобова С.Ф. Судебная нормативная пожарно-техническая экспертиза пожаров объектов хранения нефтепродуктов : монография. СПб. : СПб. Университет ГПС МЧС России, 2018. 466 с.
8. Chang J.I., Lin C.C. A study of storage tank accidents // Journal of loss prevention in the process industries. 2006. Vol. 19. No. 1. Pp. 51–59. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015
9. Fire safety in construction: Guidance for clients, designers and those managing and carrying out construction work involving significant fire risks. HSG168 (Second edition). HSE Books, 2010.
10. Александров В.Н., Галканов В.А., Мастобаев Б.Н., Кириллов Ю.К., Мальцев С.Н., Бахтин Р.Н., Локишин А.А. Совершенствование систем накопления донных нефтяных отложений в резервуарах большой вместимости // Нефтяное хозяйство. 2001. № 2. С. 70–72.
11. Гималетдинов Г.М. Очистка и диагностика резервуаров для нефти и нефтепродуктов : учеб. пособие. Уфа : Монография, 2016. 295 с.
12. Назаров В.П. Методы и способы снижения пожаровзрывоопасности процессов дегазации нефтяных резервуаров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 1. С. 19–24. DOI: 10.25257/FE.2019.1.19-24
13. Chrysalidis A., Kyzas G.Z. Applied cleaning methods of oil residues from industrial tanks // Processes. 2020. Vol. 8. No 5. P. 569. DOI: 10.3390/pr8050569
14. Jiang L., Yin D. A reference to sea water in oil tank fire of coastal oil depot // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. Vol. 267. No. 2. P. 022040. DOI: 10.1088/1755-1315/267/2/022040
15. Шевцов С.А., Быков И.А., Еськова Н.В., Владимиров Д.И., Балтабаев Д.Р. Оценка потенциального пожарного риска для оператора резервуарного парка от воздействия опасных факторов пожара // Современные проблемы гражданской защиты. 2018. № 2. С. 82–88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35467533>
16. Hu Y., Wang D., Liu J., Gao J. A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2013. Vol. 418. No. 1. P. 012037. DOI: 10.1088/1742-6596/418/1/012037
17. Плиева А.В., Освальд Е.С., Петровский В.М., Назаров В.П. Оценка экономической эффективности при подготовке резервуаров с нефтепродуктами к ремонтным огневым работам с использованием мобильных очистных комплексов // Экономика превентивных мероприятий по снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций и аварийно-спасательных работ : сб. ст. науч.-практ. конф. / под ред. А.И. Овсяник. М. : ООО «Объединенная редакция», 2019. С. 158–163.
18. Chettouh S., Hamzi R., Benaroua K. Examination of fire and related accidents in Skikda oil refinery for the period 2002–2013 // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2016. Vol. 41. Pp. 186–193. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.014
19. Zheng B., Chen G.H. Storage tank fire accidents // Process Safety Progress. 2011. Vol. 30. No. 3. Pp. 291–293. DOI: 10.1002/prs.10458
20. Ibrahim H.A., Syed H.S. Hazard analysis of crude oil storage tank farm // International Journal of Chem Tech Research. 2018. Pp. 300–308. DOI: 10.20902/IJCTR.2018.111132
21. Zhou Y., Zhao X.G., Zhao J.Y., Chen D. Research on fire and explosion accidents of oil depots // Chemical Engineering Transactions. 2016. Vol. 51. Pp. 163–168. DOI: 10.3303/CET1651028
22. Halloul Y., Chiban S., Awad A. Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2018. Vol. 41. No. 8. Pp. 948–958. DOI: 10.1080/15567036.2018.1522393

REFERENCES

1. Volkov O.M., Nazarov V.P. *Fire safety during cleaning and repair of large tanks and tankers*. Moscow, VNIIOENG Publ., 1979; 40. (rus).
2. Persson H., Lönnemark A. Tank fires-Review of fire incidents 1951–2003. *Brandforsk Project*. 2004.
3. Nazarov V.P. Problems and methods of ensuring fire and explosion safety of oil and gas complex enterprises. *Journal of the Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia*. 2005; 4. (rus).
4. Knegtering B., Pasmanb H.J. Safety of the process industries in the 21st century: A changing need of process safety management for a changing industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2009; 22(2):162-168. DOI: 10.1016/j.jlp.2008.11.005

5. Petrova N.V., Czech Li.D. Analysis of expert practice in the study of fires that occurred at the objects of oil and petroleum products meals. *Problems and prospects of forensic fire-technical expertise : materials of the International Scientific and Technical Expertise. Practice. conf.* St. Petersburg, St. Petersburg. Ministry of Emergency Situations of Russia. 2015; 78-81. (rus).
6. Petrova N.V., Czech Li.D. Establishment of fire safety requirements violation cause and effect relationships and the appearance, development and (fire) consequences on petroleum storage facilities. *Journal of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia.* 2018; 1:42-49. (rus).
7. Petrova N.V., Cheshko S.V., Sharapov S.F., Lobova S.F. *Judicial regulatory fire-technical examination fires catering facilities oil products : monograph.* SPb, Saint-Petersburg University of state fire service of EMERCOM of Russia, 2018; 466. (rus).
8. Chang J.I., Lin C.C. A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2006; 19(1):51-59. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.05.015
9. Fire safety in construction: Guidance for clients, designers and those managing and carrying out construction work involving significant fire risks. *HSG168 (Second edition).* HSE Books, 2010.
10. Alexandrov V.N., Galkanov V.A., Mastobaev B.N., Kirillov Yu.K., Maltsev S.N., Bakhtizin R.N., Lokshin A.A. Improvement of systems of accumulation of oil bottom deposits in large-capacity tanks. *Oil economy.* 2001; 2:70-72. (rus).
11. Himaletdinov G.M. *Cleaning and diagnostics of tanks for oil and petroleum products : textbook. The murder weapon.* Ufa, Monograph, 2016; 295. (rus).
12. Nazarov V.P. Methods and ways of reducing fire and explosion hazard at oil tanks degassing. *Fire and emergencies: prevention, elimination.* 2019; 1:19-24. DOI: 10.25257/FE.2019.1.19-24 (rus).
13. Chrysalidis A., Kyzas G.Z. Applied cleaning methods of oil residues from industrial tanks. *Processes.* 2020; 8(5):569. DOI: 10.3390/pr8050569
14. Jiang L., Yin D. A reference to sea water in oil tank fire of coastal oil depot. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* IOP Publishing, 2019; 267(2):022040. DOI: 10.1088/1755-1315/267/2/022040
15. Shevtsov S.A., Bykov I.A., Eskova N.V., Vladimirov D.I., Baltabaev D.R. Assessment of potential fire risk for the operator of the reservoir park from influence of dangerous factors of the fire. *Modern Problems of Civil Protection.* 2018; 2:82-88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35467533> (rus).
16. Hu Y., Wang D., Liu J., Gao J. A case study of electrostatic accidents in the process of oil-gas storage and transportation. *Journal of physics: conference series.* IOP Publishing, 2013; 418(1):012037. DOI: 10.1088/1742-6596/418/1/012037
17. Plieva A.V., Oswald E.S., Petrovsky V.M., Nazarov V.P. Assessment of economic efficiency in the preparation of tanks with petroleum products for fire repair work using mobile treatment complexes. *Evaluation of economic efficiency when preparing reservoirs with oil products for repair fire works using mobile cleaning complexes : collection of articles of the scientific and practical conference.* A. Ovsyanik (ed.). Moscow, LLC "United Edition", 2019; 158-163. (rus).
18. Chettouh S., Hamzi R., Benaroua K. Examination of fire and related accidents in Skikda Oil Refinery for the period 2002-2013. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries.* 2016; 41:186-193. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.03.014
19. Zheng B., Chen G.H. Storage tank fire accidents. *Process Safety Progress.* 2011; 30(3):291-293. DOI: 10.1002/prs.10458
20. Ibrahim H.A., Syed H.S. Hazard analysis of crude oil storage tank farm. *International Journal of Chem Tech Research.* 2018; 300-308. DOI: 10.20902/IJCTR.2018.111132
21. Zhou Y., Zhao X.G., Zhao J.Y., Chen D. Research on fire and explosion accidents of oil depots. *Chemical Engineering Transactions.* 2016; 51:163-168. DOI: 10.3303/CET1651028
22. Halloul Y., Chiban S., Awad A. Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.* 2018; 41(8):948-958. DOI: 10.1080/15567036.2018.1522393

Поступила 12.10.2021, после доработки 05.11.2021;

принята к публикации 22.11.2021

Received October 12, 2021; Received in revised form November 5, 2021;

Accepted November 22, 2021

Информация об авторах

НАЗАРОВ Владимир Петрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

ШВЫРКОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 765228; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: magistr-87@list.ru

ТАНГИЕВ Мухаммед Муратович, лейтенант внутренней службы, адъюнкт факультета подготовки научно-педагогических кадров, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; ORCID: 0000-0001-8485-8925; e-mail: tm_cfd@mail.ru

ПЕТРОВ Анатолий Павлович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 765316; ORCID: 0000-0002-7757-1771; e-mail: setyn@list.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Vladimir P. NAZAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; Researcher ID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Sergey A. SHVYRKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 479363; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: pbtp@mail.ru

Mukhammed M. TANGIEV, Lieutenant of the Internal Service, Post Graduate Student of the Faculty of Training of Scientific and Pedagogical Personnel, the State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8485-8925; e-mail: tm_cfd@mail.ru

Anatoliy P. PETROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 765316; ORCID: 0000-0002-7757-1771; e-mail: setyn@list.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 61–72
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):61-72

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.014:699.812+614.84

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72>

Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки

Сергей Викторович Пузач, Татьяна Юрьевна Еремина,
Дмитрий Александрович Корольченко ✉

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Аннотация

Введение. Пределы огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций могут быть определены с помощью метода расчета тепломассообмена при пожаре. Применение метода осложняется многофакторностью и нелинейностью задачи. При необходимости может быть создан температурный режим, учитывающий реальные условия пожара. В данной работе проведены расчеты фактических пределов огнестойкости металлических конструкций теплоэлектростанции.

Цели и задачи. Определение фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций при наиболее опасном сценарии развития реального пожара.

Методы исследования. С учетом сложности объемно-планировочных решений здания выбран полевой метод расчета, который может быть применен для помещений сложной геометрической конфигурации, в которых один из геометрических размеров гораздо больше остальных. Решаются нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения законов сохранения массы, импульса и энергии для газовой среды помещения (уравнения Навье – Стокса в форме Рейнольдса), а также для компонентов газовой среды и оптической плотности дыма. Для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае решается уравнение теплопроводности. Пределом огнестойкости строительной конструкции считается момент времени от начала пожара, когда температура хотя бы в одном месте конструкции достигает критического значения.

Результаты и обсуждение. Результаты расчетов показали, что при наиболее опасном сценарии развития пожара максимальные температуры несущих металлических конструкций в течение 15 мин от начала пожара существенно меньше критической температуры 500 °С.

Выводы. Огнезащита несущих металлических конструкций, расположенных в машинном отделении с паровыми турбинами, не требуется.

Ключевые слова: опасные факторы пожара; полевая модель; динамика развития пожара; сценарии развития пожара; несущие металлические конструкции

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект #FSWG-2020-0007).

Для цитирования: Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 61–72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72

✉ Корольченко Дмитрий Александрович, e-mail: KorolchenkoDA@mgisu.ru

The evaluation of actual fire resistance limits of steel structures exposed to real fire loading

Sergey V. Puzach, Tatyana Yu. Eremina, Dmitriy A. Korolchenko ✉

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The fire resistance limits of load-bearing and enclosing structures can be identified using the method of heat-and-mass transfer calculation in case of fire. The multifactorial nature and nonlinearity of the problem makes the application of this method complicated. If necessary, the temperature regime, demonstrating the conditions of real fire, can be applied. In this work, actual fire resistance limits of metal structures of a thermal power station are calculated.

Goals and objectives. The co-authors attempt to identify the actual fire resistance limits of bearing metal structures in case of the most dangerous fire development scenario.

Methods. Taking into account the complexity of space-planning solutions of a building, the field-focused calculation method was selected. This method is applicable to premises, featuring complex geometric shape, where one geometric dimension is much larger than the others. Non-stationary three-dimensional differential equations of mass, momentum and energy conservation are solved for the gas medium inside a room (the Reynolds type of Navier–Stokes equations), as well as the components of the gas medium and the optical density of smoke. A heat transfer equation is solved to determine the temperature distribution inside the building structure for a one-dimensional case. The fire resistance limit of the building structure is identified as the moment in time following the start of fire, when the temperature in, at least, one point of the structure reaches a critical value.

Results and discussion. Calculation results show that in case of the most dangerous fire development scenario, within 15 minutes as of the start of fire, maximum temperatures of load-bearing metal structures are far below the critical temperature of 500 °C.

Conclusions. Load-bearing metal structures in an engine room, that has steam turbines, don't need fire protection.

Keywords: dangerous fire factors; field model; fire development dynamics; fire development scenarios; bearing metal structures

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project: Theoretical and experimental design of new composite materials to ensure safety during the operation of buildings and structures under conditions of technogenic and biogenic threats #FSWG-2020-0007).

For citation: Puzach S.V., Eremina T.Yu., Korolchenko D.A. The evaluation of actual fire resistance limits of steel structures exposed to real fire loading. *Pozharovzryvobezopasnost'/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):61-72. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.61-72 (rus).

✉ Dmitriy Aleksandrovich Korolchenko, e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Введение

При анализе пожарной опасности в соответствии с нормативными документами могут использоваться расчетные сценарии, основанные на соотношении временных параметров развития и распространения опасных факторов пожара и позволяющие определить риск для людей и конструкций объектов и выбрать наиболее эффективные системы противопожарной защиты.

В соответствии с п. 2 ст. 35 Федерального закона № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»¹ наступление пределов огнестойкости несущих и ограждающих строительных конструкций можно определять в результате расчетов. Поэтому при определении огнестойкости строительных конструкций вопрос точности и надежности метода расчета тепломассообмена при пожаре является ключевым. Сложность реализации такого метода заключается в многофакторности и нелинейности задачи.

Также в соответствии с п. 6.1 ГОСТ 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»², при необхо-

димости может быть создан температурный режим, учитывающий реальные условия пожара.

В данной работе проведены расчеты фактических пределов огнестойкости металлических конструкций, находящихся в ТЭЦ.

При расчете реального пожара используется нормативный полевой метод расчета динамики опасных факторов пожара, описанный в Методике определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (приложение к приказу МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382) (далее — Методика)³ и Изменениях, вносимых в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности⁴. Нормативный полевой метод расчета динамики опасных факторов пожара основан на работах [1–3] и реализован в программах расчета на ЭВМ, имеющих свидетельства об официальной регистрации программы в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам [4, 5].

Цель работы — определить фактические пределы огнестойкости несущих металлических кон-

¹ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ : принят Государственной Думой 4 июля 2008 г. ; одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 г.

² ГОСТ 30247.0–94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования : принят Межгосударственной научно-технической комиссией по стандартизации и техническому нормированию в строительстве (МНТКС) 17 ноября 1994 г.

³ Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : утверждена приказом МЧС России от 30 июня 2009 года № 382.

⁴ Изменения, вносимые в методику определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности (приложение к приказу МЧС России от 12 декабря 2011 г. № 749) : утверждена приказом МЧС России от 30 июня 2009 г. № 382.

струкций при наиболее опасном сценарии развития реального пожара.

Методология расчета

Выбор конкретной модели расчета динамики развития пожара в соответствии с Методикой следует осуществлять исходя из следующих предположений:

интегральный метод:

- для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);

зонный (зональный) метод:

- для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара;
- для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз).

В отличие от интегральных моделей зональный метод может использоваться:

- для помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;
- для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т.д.);

полевой метод:

- для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т.д.);
- для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т.д.);
- для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т.д.).

Учитывая сложность объемно-планировочных решений рассматриваемого здания, выбираем полевой метод расчета.

Основой для полевых моделей пожаров являются уравнения, выражающие законы сохранения массы, импульса, энергии и масс компонентов в рассматриваемом малом контрольном объеме.

Уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0. \quad (1)$$

Уравнение сохранения импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i. \quad (2)$$

Для ньютоновских жидкостей, подчиняющихся закону Стокса, тензор вязких напряжений определяется выражением:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}. \quad (3)$$

Уравнение энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h) = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \dot{q}_j^R}{\partial x_j}, \quad (4)$$

где $h = h_0 + \int_{T_0}^T c_p dT + \sum_k Y_k H_k$ — статическая энтальпия смеси;

H_k — теплота образования k -го компонента;

$c_p = \sum_k Y_k c_{p,k}$ — теплоемкость смеси при постоянном давлении;

$\dot{q}_j^R$ — радиационный поток энергии в направлении x_j .

Уравнение сохранения химического компонента k :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_k) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j Y_k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial Y_k}{\partial x_j} \right) + S_k. \quad (5)$$

Для замыкания системы уравнений (1)–(5) используется уравнение состояния идеального газа. Для смеси газов оно имеет вид:

$$p = \rho R_0 T \sum_k \frac{Y_k}{M_k}, \quad (6)$$

где R_0 — универсальная газовая постоянная;

M_k — молярная масса k -го компонента.

Полевая математическая модель расчета тепломассообмена при пожаре

Для расчета тепломассообмена используется полевая модель пожара, соответствующая модели. При этом решаются нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения законов сохранения

массы, импульса и энергии для газовой среды помещения (уравнения Навье – Стокса в форме Рейнольдса), а также для компонентов газовой среды и оптической плотности дыма. Все дифференциальные уравнения приведены к стандартному виду [6], удобному для численного решения:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \operatorname{div}(\rho w \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (7)$$

где Φ — зависимая переменная;

Γ — коэффициент диффузии для Φ ;

S — источниковый член;

ρ — плотность газа, кг/м³;

w — скорость газа, м/с;

τ — время, с.

Все величины здесь и далее являются усредненными по времени.

Параметры и коэффициенты уравнения (7) приведены в таблице.

Используется k - ε -модель турбулентности со следующим набором эмпирических констант [7–14]: $C_1 = 1,44$; $C_2 = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $C_\mu = 0,09$. Эффективная вязкость газа в уравнении (7) представлена в виде $\mu_{\text{эф}} = \mu + \mu_t$, эффективная теплопроводность: $\lambda_{\text{эф}} = \lambda + \lambda_t + \lambda_d$, эффективная диффузия: $D_{\text{эф}} = D + D_t$.

Для расчета турбулентного тепломассообмена также в качестве дополнительного подтверждения надежности полученных результатов применяется модель Смагоринского [15].

Вязкость газа определяется по формуле Сазерленда [7], турбулентная вязкость — по формуле Колмогорова [7]. Коэффициент турбулентной теплопроводности определяется из соотношения $\lambda_t = c_p \mu_t / \operatorname{Pr}_t$, а коэффициент турбулентной диффузии — $D_t = \mu_t / \rho \operatorname{Pr}_d$. Принимаем, что $\operatorname{Pr}_t = \operatorname{Pr}_d = 1$ [16].

Для расчета лучистого теплопереноса используется диффузионный метод (метод моментов) [17–20]. При этом $\lambda_d = 0$, а источниковый член в уравнении энергии имеет вид:

$$S_\lambda = -\frac{4\pi}{3} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

где I_o — интенсивность излучения, определяемая из решения уравнения:

$$\frac{1}{k} \left(\frac{\partial^2 I_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 I_o}{\partial z^2} \right) = 3\chi(I_o - I_b), \quad (9)$$

где k , χ — интегральные коэффициенты ослабления и излучения среды;

$I_b = \sigma T^4$ — интенсивность излучения абсолютно черного тела;

σ — постоянная излучения абсолютно черного тела;

T — температура;

x , y , z — координаты вдоль длины, ширины и высоты соответственно.

Принимаем, что локальный интегральный коэффициент ослабления излучения равен локальному интегральному коэффициенту излучения (излучающая, поглощающая и нерассеивающая среда) и находится по локальной величине оптической плотности дыма:

$$k = \lambda^* W, \quad (10)$$

где W — локальная величина оптической плотности дыма, определяемая из решения соответствующего уравнения (7);

λ^* — коэффициент для пересчета оптического диапазона излучения в инфракрасный [1, 21, 22].

Массовая скорость газификации твердой пожарной нагрузки равна [2]:

$$\psi = \psi_{\text{уд}} \pi r^2, \quad (11)$$

где $r = w_{\text{пл}} \tau$ — радиус зоны горения.

В случае горючей жидкости [2]:

$$\tau \leq \tau_{\text{ст}}: \psi = \psi_{\text{уд}} F_r \sqrt{\tau / \tau_{\text{ст}}}; \quad (12)$$

$$\tau > \tau_{\text{ст}}: \psi = \psi_{\text{уд}} F_r, \quad (13)$$

где $\tau_{\text{ст}}$ — время стабилизации горения;

$\psi_{\text{уд}}$ — удельная массовая скорость газификации пожарной нагрузки.

Скорость выделения оптической плотности дыма при горении горючего материала [2, 23–26]:

$$W = W_{\text{уд}} \psi. \quad (14)$$

Область горения задается объемными источниками массы и тепла, равномерно распределенными в объеме области горения.

Граничные условия к уравнению (7) принимаются следующими:

а) на внутренних поверхностях ограждающих конструкций проекции скоростей равны нулю; для уравнения энергии задаются граничные условия 3-го рода; для остальных параметров принимается, что $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$;

б) на открытом проеме $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0$ в области истечения газа наружу; в области поступления наружного воздуха внутрь давление, температура и концентрации компонентов соответствуют параметрам атмосферного воздуха, где n — нормаль к поверхности.

Уравнение (7) решается методом контрольных объемов [6] по неявной конечно-разностной схеме на шахматной сетке с помощью продольно-поперечной прогонки. При этом используется уравнение для поправки давления в сжимаемой форме. Распределение параметров газовой среды

внутри каждого контрольного объема принимается соответствующим схеме с разностями против потока. Точность расчетов контролируется выполнением локального и интегрального законов сохранения массы и энергии в расчетной области.

Расчет прогрева ограждающих конструкций проводится на основе трехмерных дифференциальных уравнений теплопроводности, решенных совместно с системой уравнений (7) (см. таблицу).

Полевая модель включена в нормативные методики расчета динамики опасных факторов пожара.

Более подробно описание математической модели приведено в [1]. Там же представлены результаты сопоставления расчета по предложенной модели с аналитическими решениями, интегральной моделью и экспериментальными данными.

Математическая модель расчета прогрева строительных конструкций

Для определения распределения температур внутри строительной конструкции в одномерном случае решается уравнение теплопроводности [27]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (15)$$

где ρ — плотность материала конструкции, кг/м³;
 c — удельная теплоемкость материала конструкции, Дж/(кг · К);
 T — температура, К;
 λ — коэффициент теплопроводности материала конструкции, Вт/(м · К);
 y — координата, направленная по толщине стенки конструкции, м;
 τ — время, с.

Параметры и коэффициенты уравнения (7)

Parameters and coefficients in equation (7)

Ф	Г	S
1	0	G_M
w_x	$\mu + \mu_T$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) - \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma \operatorname{div} w)$
w_y	$\mu + \mu_T$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial w_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) - \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\Gamma \operatorname{div} w)$
w_z	$\mu + \mu_T$	$\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial w_x}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial w_y}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\Gamma \operatorname{div} w) - \rho g - \frac{\partial p}{\partial z}$
X_{O_2}	$(D_{O_2} + D_{O_2T})\rho$	$-L_{O_2}\psi\eta$
X_{CO}	$(D_{CO} + D_{CO_T})\rho$	$L_{CO}\psi\eta$
X_{CO_2}	$(D_{CO_2} + D_{CO_2T})\rho$	$L_{CO_2}\psi\eta$
k	μ_T/σ_k	$v_T \left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_T} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \varepsilon$
ε	μ_T/σ_ε	$C_1 \frac{\varepsilon}{k} v_T \left(\frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_T} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$
W	0	$W_{yd}\psi$
i	$\lambda + \lambda_T + \lambda_{II}$	$\psi\eta Q_p^H - Q_{II} + \mu\Phi_{II}$

Уравнение (15) решается численным методом контрольных объемов [6].

Предполагаем идеальный тепловой контакт между слоями конструкции, изготовленными из различных материалов, что также является наиболее опасным вариантом с точки зрения нагрева конструкции.

Граничные условия к уравнению (15) являются граничными условиями 2-го рода. На границах расчетной области задается плотность теплового потока:

$$q_{гр} = f(\tau). \quad (16)$$

Плотность теплового потока на внешней (огневой) границе стенки определяется из решения уравнения полевой модели или по формулам расчета лучистого теплового потока.

Основой для расчета нагрева строительной конструкции от теплового излучения является уравнение лучистого теплообмена [28–30]:

$$q = \varepsilon_{пр} c_0 \left[\left(\frac{T_{и}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{пов}}{100} \right)^4 \right] \psi_{21}, \quad (17)$$

где q — плотность теплового потока, попадающего на поверхность конструкции, Вт/м²;

$T_{и}$ — температура излучающей поверхности, К;

$T_{пов}$ — температура на облучаемой поверхности конструкции, К;

$\varepsilon_{пр}$ — приведенная степень черноты системы;

c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,7 Вт/(м²·К⁴);

ψ_{21} — коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями, в который в неявной форме входит расстояние r по нормали между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облученности для одной четвертой части площади поверхности факела вычисляется по формуле [31]:

$$\psi_{21} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \arctg \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \arctg \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right), \quad (18)$$

где r — расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями по нормали, м;

a и b — стороны прямоугольника пламени [28], м.

За наступление предела огнестойкости строительной конструкции принимается момент времени от начала пожара, когда температура хотя бы в одном месте конструкции достигает критического значения.

Расчет по одномерному уравнению теплопроводности существенно завышает пределы огнестойкости конструкций, так как не учитывается

отвод тепла от огневой поверхности конструкции в продольном направлении конструкции.

Исходные данные для расчетов

Рассматриваем первый этап технического перевооружения пылеугольной ТЭЦ. На этом этапе выполняется замена двух турбин.

Класс функциональной пожарной опасности здания: Ф5 (электростанции).

Требуемые пределы огнестойкости несущих металлических конструкций в соответствии с СТУ на объект равны R15.

Здание главного корпуса, в том числе и машинное отделение, выполнено по каркасной схеме. Рама каркаса представляют собой стальные колонны, на которые опираются стальные стропильные фермы или балки покрытия, а также междуэтажные балки перекрытий. Основными элементами несущего каркаса здания, обеспечивающими жесткость и устойчивость в поперечном направлении, являются плоские поперечные рамы, образованные стальными колоннами, жестко заземленными в фундаментах и опирающимися на них металлическими стропильными фермами. В продольном направлении жесткость здания обеспечивается постановкой наклонных и горизонтальных связей по каждому ряду колонн. Высота здания до низа стропильных ферм составляет 21,60 м. Здание машинного отделения № 2 оборудовано мостовым краном 100/20 т.

Ограждением служат кирпичные стены из глиняного полнотелого кирпича на цементно-песчаном растворе, толщина стен по осям А, Б — 640 (720) мм, по оси В — 250 мм, местами стены выполнены из навесных панелей.

Колонны смонтированы с шагом 6,5 м. Жесткость и устойчивость каркаса производственного здания обеспечивается: жесткой заделкой колонн в фундамент с помощью анкерных болтов; в поперечном направлении — многэтажной двухпролетной этажеркой (пролеты Б-Г), к которой шарнирно примыкают фермы машинного отделения и котельных, а также рамы помещений электрофильтров и дымососного отделения; в продольном направлении — вертикальными крестовыми связями между колоннами.

Стальные опорные конструкции трубопроводов и оборудования выполняются из прокатных профилей по ГОСТ 26020–83⁵, ГОСТ 8240–97⁶,

⁵ ГОСТ 26020–83. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Сортамент: постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 17 декабря 1983 г. № 6095, дата введения установлена 01 января 1986 г.

⁶ ГОСТ 8240–97. Швеллеры стальные горячекатаные. Сортамент: принят Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 11 от 23 апреля 1997 г.).

ГОСТ 8509–93⁷, ГОСТ 30245–2003⁸, ГОСТ Р 57837–2017⁹ или сварных сечений.

Рассматриваем наиболее опасный сценарий развития пожара с точки зрения нагрева несущих металлических конструкций: горение пролива турбинного масла на площади 16 м² на отм. 0,000 в машинном отделении с паровыми турбинами.

Наибольшему тепловому воздействию подвергаются:

- колонна КА1 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм;
- фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм.

Теплофизические свойства стальных конструкций определялись по [9, 16]:

- плотность — $\rho = 7800$ кг/м³;
- удельная теплоемкость — $c = 470 + 0,21t + 5,0 \times 10^{-4}t^2$ Дж/(кг · К);
- коэффициент теплопроводности — $\lambda = 58 - 0,042t$ Вт/(м · К), где t — температура, °С.

⁷ ГОСТ 8509–93. Уголки стальные горячекатаные равнополочные. Сортамент: принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 3 от 17 февраля 1993 г.).

⁸ ГОСТ 30245–2003. Профили стальные гнутые замкнутые сварные квадратные и прямоугольные для строительных конструкций. Технические условия (с Поправкой): принят Межгосударственной научнотехнической комиссией по стандартизации, техническому нормированию и сертификации в строительстве (МНТКС) 22 октября 2003 г.

⁹ ГОСТ Р 57837–2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия (с Поправкой, с Изменением № 1): утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 24 октября 2017 г. № 1515-ст.

Критическую температуру для стальных конструкций принимаем равной $T_{кр} = 500$ °С [3, 5, 32–35].

Пожарно-технические характеристики горючих материалов в помещениях здания определялись по типовой базе пожарной нагрузки [35]:

- турбинное масло:
низшая рабочая теплота сгорания — $Q_n^p = 41,9$ МДж/кг;
удельная скорость выгорания — $\psi_{уд} = 0,03$ кг/(м² · с);
потребление кислорода при горении — $L_{O_2} = -2,82$;
выделение окиси углерода — $L_{CO} = 0,122$;
выделение двуокиси углерода — $L_{CO_2} = 0,7$;
удельное дымовыделение — $W_{уд} = 243$ Нп · м²/кг.

Концентрация кислорода, при которой прекращается горение, в расчетах принята равной $X_{O_2, \min} = 14$ % (по массе).

Параметры атмосферного воздуха принимались следующими:

- температура — 20 °С;
- давление — $1,013 \cdot 10^5$ Па.

Результаты расчетов и их обсуждение

Расчеты динамики опасных факторов пожара и пределов огнестойкости строительных конструкций здания выполнены с использованием программного комплекса [3, 4].

Результаты расчетов температурного режима пожара и фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций представлены на рис. 1–3, где показаны поля температур, °С, скоростей, м/с, и схемы течения в поперечных и продольных сечениях очага пожара, проходящих через источник возгорания.

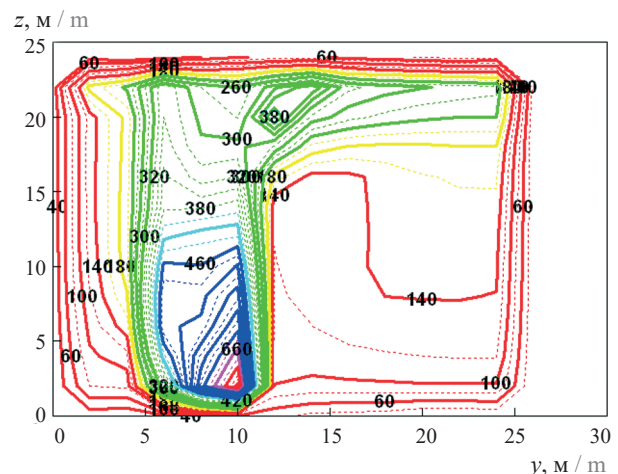
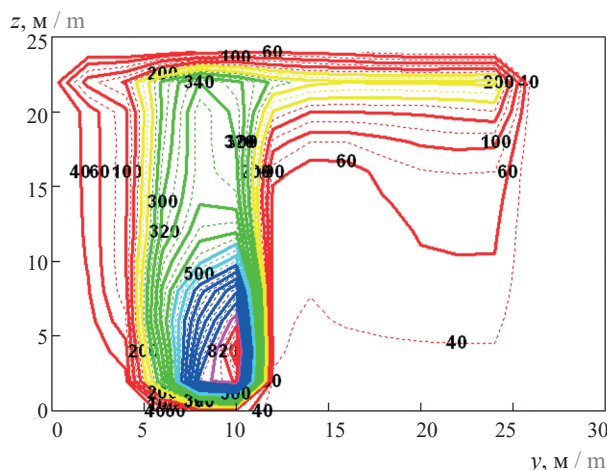


Рис. 1. Поля температур в поперечном сечении машинного отделения с паровыми турбинами, проходящего через источник возгорания, через 5 и 15 мин от начала реального пожара

Fig. 1. Temperature fields in the cross-section of an engine room that has steam turbines, passing through the ignition source, 5 and 15 min after the fire gets started

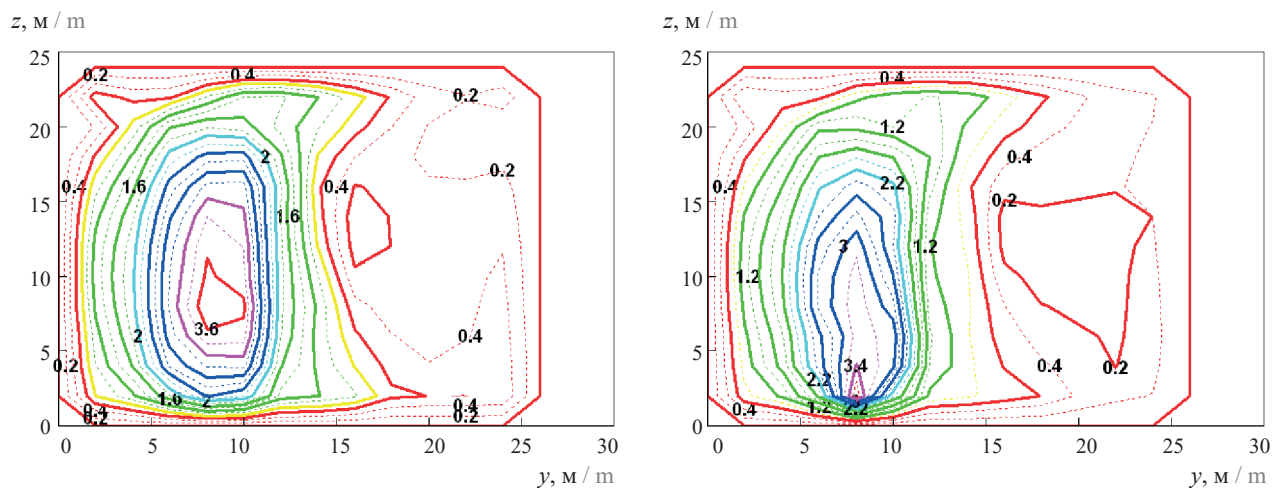


Рис. 2. Поля скоростей в поперечном сечении машинного отделения с паровыми турбинами, проходящего через источник возгорания, через 5 и 15 мин от начала реального пожара

Fig. 2. Velocity fields in the cross-section of an engine room that has steam turbines, passing through the ignition source, 5 and 15 min after the fire gets started

Координаты x , y и z направлены вдоль длины, ширины и высоты здания соответственно.

На рис. 4 представлены зависимости максимальных температур колонны КА1 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм и фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +23,950.

Результаты расчетов показали, что при наиболее опасном сценарии развития пожара максимальные температуры несущих металлических конструкций в течение 15 мин от начала пожара существенно меньше критической температуры $T_{кр} = 500$ °C.

Таким образом, огнезащита несущих металлических конструкций, расположенных в машинном отделении с паровыми турбинами, не требуется.

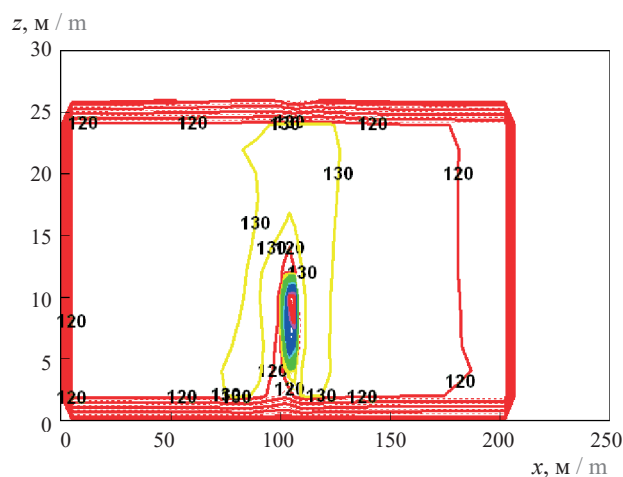


Рис. 3. Поля температур в продольном сечении машинного отделения с паровыми турбинами, проходящего через источник возгорания, через 5 и 15 мин от начала реального пожара

Fig. 3. Temperature fields in the longitudinal section of an engine room that has steam turbines, passing through the ignition source, 5 and 15 min after the fire gets started

Выводы

Проведенные расчеты фактических пределов огнестойкости несущих металлических конструкций, находящихся в ТЭЦ, показали, что при наиболее опасном сценарии развития реального пожара фактические пределы огнестойкости несущих металлических конструкций больше требуемых R15, поэтому огнезащита вышеуказанных конструкций не требуется.

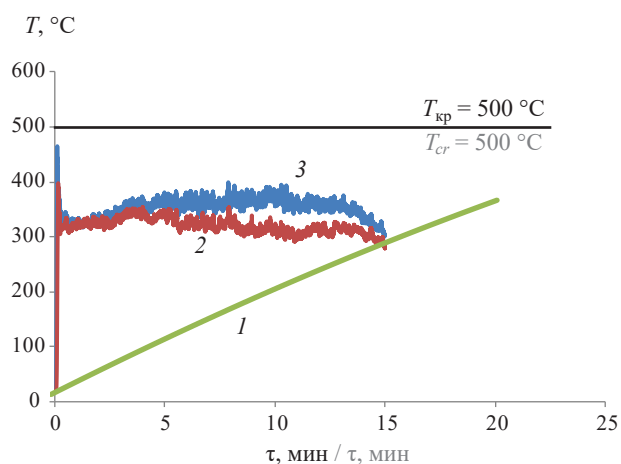


Рис. 4. Зависимости характерных температур развития пожара: 1 — максимальная температура колонны КА1 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 8,893$ мм; 2 — максимальная температура фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +23,950; 3 — максимальная температура фермы L 60×5 с приведенной толщиной $\delta_{пр} = 2,4$ мм, расположенной на отметке +21,400

Fig. 4. The relationship between characteristic fire temperatures: 1 — the maximal temperature of column KA1 with reduced thickness $\delta_{red} = 8.893$ mm; 2 — the maximal temperature of roof truss L 60×5 with reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, at the level of +23.950; 3 — the maximal temperature of roof truss L 60×5 with reduced thickness $\delta_{red} = 2.4$ mm, at the level of +21.400

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. М. : Академия ГПС МЧС России, 2005. 336 с.
2. Кошмаров Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МВД России, 2000. 118 с.
3. Пузач С.В., Зернов С.И., Богатищев А.И., Карпов С.Ю. Расчет фактических пределов огнестойкости строительных конструкций с учетом реальных параметров пожара, действий систем пожаротушения, механической вентиляции и дымоудаления (математическая модель и методика расчета). Саранск : Мордовское книжное издательство, 2004. 80 с.
4. Пузач С.В. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара : свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 08.12.2006. № 2006613462; заявл. 12.10.2006.
5. Пузач С.В. Определение огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара : свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614237 в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам от 08.12.2006 г.
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 150 с.
7. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М. : Наука, 1987. 840 с.
8. Hosoya T., Kawamoto H., Saka S. Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2007. Vol. 78. Pp. 328–336. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.08.008
9. Boonmee N., Quintiere J.G. Glowing and flaming autoignition of wood // Proceedings of the Combustion Institute. 2002. Vol. 29. Issue 1. Pp. 289–296.
10. Zelinka S.L., Pei S., Bechle N., Sullivan K., Ottum N., Rammer D.R., Hasburgh L.E. et al. Performance of wood adhesive for cross laminated timber under elevated temperatures // Proceedings, WCTE 2018-world conference on timber engineering, Seoul, Republic of Korea. 2018. 7 p.
11. Boonmee N.A. A theoretical investigation of surface glowing ignition leading to gas flaming autoignition // Fire Safety Science. 2005. Vol. 8. Pp. 139–150. DOI: 10.3801/iafss.fss.8-139
12. Babrauskas V. Ignition of wood: A review of the state of the art // Journal of Fire Protection Engineering. 2002. Vol. 12. Issue 3. Pp. 163–189. DOI: 10.1177/10423910260620482
13. Anon ANSI/APA PRG 320: standard for performance rated cross-laminated timber. APA — The Engineered Wood Association, Tacoma. 2018.
14. Merryweather G., Spearpoint M.J. Flame spread measurements on wood products using the ASTM E 1321 LIFT apparatus and a reduced scale adaptation of the cone calorimeter // Flame and Materials. 2010. Vol. 34. Issue 3. Pp. 109–136. DOI: 10.1002/fam.1001
15. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations // Monthly Weather Review. 1963. Vol. 91. Issue 3. Pp. 99–164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWT P>2.3.CO;2
16. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. М. : Атомиздат, 1979. 416 с.
17. Кошмаров Ю.А. Теплотехника. М. : Академия ГПС МЧС России, 2006. 501 с.
18. White R.H., Dietsenberger M.A. Fire Safety // Wood Handbook — Wood as an Engineering Material, Ch. 17. US : Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 2002. 508 p.
19. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B., Thanh D.D. Heat and smoke release at the combustion of the different wood varieties // Fire science and technology 6th Asia — Oceania symposium Daegu, Korea, Korean Institute of Fire Science and Engineering, March 17–20. 2004. Pp. 203–211.
20. Ушанов В.В., Фадеев В.Е., Харитонов В.С., Щелкунов В.И., Павловский А.В., Косачев А.А. Огнестойкость и пожарная опасность сэндвич-панелей и предложения по внесению изменений в нормативные правовые акты по пожарной безопасности в части их применения в зданиях и сооружениях различного функционального назначения // Пожарная безопасность. 2016. № 4. С. 119–122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27521504>
21. Lyon R.E., Quintiere J.G. Criteria for piloted ignition of combustible solids // Combustion and Flame. 2007. Vol. 151. Issue 4. Pp. 551–559. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2007.07.020

22. *Andersen J.* Experimental study of the thermal resistance of intumescent coatings exposed to different heating rates : Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 2015.
23. *Su J., Lafrance P.-S., Hoehler M., Bundy M.* Fire safety challenges of tall wood buildings phase 2: task 2 & 3 cross laminated timber compartment fire tests, fire protection research foundation, Quincy, MA U.S. Energy Information Administration (EIA) (s.d.) Consulté 22 novembre 2019, à l'adresse. 2018. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
24. *Simões G., Magalhães D., Rabaçal M., Costa M.* Effect of gas temperature and oxygen concentration on single particle ignition behavior of biomass fuels // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017. Vol. 36. Issue 2. Pp. 2235–2242. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.102
25. *Corbetta A.F., Frassoldati A., Bennadji H., Smith K., Serapiglia M.J., Gauthier G. et al.* Pyrolysis of centimeter-scale woody biomass particles: kinetic modeling and experimental validation // *Energy & Fuels*. 2014. Vol. 28. Issue 6. Pp. 3884–3898. DOI: 10.1021/ef500525v
26. *Di Blasi C., Branca C., Santoro A., Hernandez E.G.* Pyrolytic behaviour and products of some wood varieties // *Combustion and Flame*. 2001. Vol. 124. Issue 1-2. Pp. 165–177. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00191-7
27. Пожарная нагрузка. Справочник. Редакция 2. 15.05.2014. Строительные Информационные Технологии и Системы. СИТИС-СПИ-1. 2014. 53 с.
28. *Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y.* Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure // *Fire Technology*. 2019. Vol. 52. Issue 4. Pp. 1015–1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2
29. *Haseli Y., Van Oijen J.A., De Goey L.P.H.* A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particle // *Bioresource Technology*. 2011. Vol. 102 (20). Pp. 9772–9782. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.07.075
30. *Janssens M.* Development of a fire performance assessment methodology for qualifying cross-laminated timber adhesives. SwRI Project No. 01.23086.01.001a, Southwest Research Institute, San Antonio, TX. 2017. 78 p.
31. *Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B.* Fire behavior and fire protection in timber buildings. Germany : Springer Series in Wood Science, 2014. 280 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
32. *Болдырев А.С., Золотов П.П., Люсов А.Н., Кабанов Н.П., Филиппович Н.И.* Строительные материалы : справочник / под ред. А.С. Болдырева. М. : Стройиздат, 1989. 567 с.
33. *Яковлев А.Я.* Расчет огнестойкости строительных конструкций. М. : Стройиздат, 1988. 143 с.
34. *Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang D., Zhang C.* Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves // *Fire Technology*. 2015. Vol. 51. Issue 3. Pp. 627–643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7
35. *Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y.* Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure // *Fire Technology*. 2016. Vol. 52. No. 4. Pp. 1015–1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2

REFERENCES

1. *Puzach S.V.* *Methods for calculating heat and mass transfer during a fire in a room and their application in solving practical problems of fire and explosion safety*. Moscow, Academy of GPS EMERCOM of Russia, 2005; 336. (rus).
2. *Koshmarov Yu.A.* *Forecasting hazardous factors of a fire in a room : tutorial*. Moscow, Academy of the State Fire Service of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2000; 118. (rus).
3. *Puzach S.V., Zernov S.I., Bogatishchev A.I., Karpov S.Yu.* *Calculation of the actual limits of fire resistance of building structures, taking into account the real parameters of the fire, the actions of fire extinguishing systems, mechanical ventilation and smoke removal (mathematical model and calculation method)*. Saransk, Mordovian book publishing house, 2004; 80. (rus).
4. *Puzach S.V.* *Integral, zone and field methods for calculating the dynamics of fire hazards* : Certificate of official registration of the program No. 2006614238 in the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks dated December 8, 2006. No. 2006613462; December 10, 2006. (rus).
5. *Puzach S.V.* *Determination of fire resistance of building structures, taking into account the parameters of a real fire* : Certificate of official registration of the program No. 2006614237 with the Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trademarks dated December 8, 2006. (rus).
6. *Patankar S.* *Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984; 150. (rus).

7. Loitsyansky L.G. *Mechanics of liquid and gas*. Moscow, Nauka Publ., 1987; 840. (rus).
8. Hosoya T., Kawamoto H., Saka S. Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2007; 78:328-336. DOI: 10.1016/j.jaap.2006.08.008
9. Boonmee N., Quintiere J.G. Glowing and flaming autoignition of wood. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2002; 29(1):289-296.
10. Zelinka S.L., Pei S., Bechle N., Sullivan K., Ottum N., Rammer D.R., Hasburgh L.E. Performance of wood adhesive for cross laminated timber under elevated temperatures. *Proceedings, WCTE 2018-world conference on timber engineering, Seoul, Republic of Korea*. 2018; 7.
11. Boonmee N.A. A theoretical investigation of surface glowing ignition leading to gas flaming autoignition. *Fire Safety Science*. 2005; 8:139-150. DOI: 10.3801/iafss.fss.8-139
12. Babrauskas V. Ignition of wood: A review of the state of the art. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2002; 12(3):163-189. DOI: 10.1177/10423910260620482
13. Anon ANSI/APA PRG 320: *standard for performance rated cross-laminated timber*. APA — The Engineered Wood Association, Tacoma. 2018.
14. Merryweather G., Spearpoint M.J. Flame spread measurements on wood products using the ASTM E 1321 LIFT apparatus and a reduced scale adaptation of the cone calorimeter. *Flame and Materials*. 2010; 34(3):109-136. DOI: 10.1002/fam.1001
15. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*. 1963; 91(3):99-164. DOI: 10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2
16. Kutateladze S.S. *Fundamentals of the theory of heat transfer*. Moscow, Atomizdat Publ., 1979; 416. (rus).
17. Koshmarov Yu.A. *Heat engineering*. Moscow, Academy of GPS EMERCOM of Russia, 2006; 501. (rus).
18. White R.H., Dietenberger M.A. Fire Safety. *Wood Handbook — Wood as an Engineering Material, Ch. 17*. US, Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, 2002; 508.
19. Aseeva R.M., Serkov V.V., Sivenkov A.B., Thanh D.D. Heat and smoke release at the combustion of the different wood varieties. *Fire science and technology 6th Asia — Oceania symposium Daegu, Korea, Korean Institute of Fire Science and Engineering, March 17 (Wed) – 20 (Sat)*. 2004. Pp. 203–211.
20. Ushanov V.V., Fadeev V.E., Kharitonov V.S., Shchelkunov V.I., Pavlovsky A.V., Kosachev A.A. Fire resistance and fire hazard of sandwich panels and the proposals on amendments to the normative legal acts on fire safety regarding their application in buildings and structures of various functionality. *Pozharnaya bezopasnost'/Fire Safety*. 2016; 4:119-122. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27521504> (rus).
21. Lyon R.E., Quintiere J.G. Criteria for piloted ignition of combustible solids. *Combustion and Flame*. 2007; 151(4):551-559. DOI: 10.1016/J.COMBUSTFLAME.2007.07.020
22. Andersen J. *Experimental study of the thermal resistance of intumescent coatings exposed to different heating rates*: Master of Science thesis, Civil Engineering Department, Technical University of Denmark, Copenhagen, Denmark, 2015.
23. Su J., Lafrance P.-S., Hoehler M., Bundy M. Fire safety challenges of tall wood buildings phase 2: task 2 & 3 cross laminated timber compartment fire tests, fire protection research foundation, Quincy, MA U.S. Energy Information Administration (EIA) (s.d.) Consulté 22 November 2019, à l'adresse. 2018. URL: <https://www.eia.gov/energyexplained/biomass/>
24. Simões G., Magalhães D., Rabaçal M., Costa M. Effect of gas temperature and oxygen concentration on single particle ignition behavior of biomass fuels. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2017; 36(2):2235-2242. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.102
25. Corbetta A.F., Frassoldati A., Bennadji H., Smith K., Serapiglia M.J., Gauthier G. et al. Pyrolysis of centimeter-scale woody biomass particles: kinetic modeling and experimental validation. *Energy & Fuels*. 2014; 28(6):3884-3898. DOI: 10.1021/ef500525v
26. Di Blasi C., Branca C., Santoro A., Hernandez E.G. Pyrolytic behaviour and products of some wood varieties. *Combustion and Flame*. 2001; 124(1-2):165-177. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00191-7
27. *Fire load. Directory. Edition 2. May 15, 2014. Building Information Technologies and Systems. SITIS-SPN-I*. 2014; 54. (rus).
28. Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y. Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure. *Fire Technology*. 2019; 52(4):1015-1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2
29. Haseli Y., Van Oijen J.A., De Goey L.P.H. A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particle. *Bioresource Technology*. 2011; 102(20):9772-9782. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.07.075

30. Janssens M. *Development of a fire performance assessment methodology for qualifying cross-laminated timber adhesives*. SwRI Project No. 01.23086.01.001a, Southwest Research Institute, San Antonio, TX. 2017; 78.
31. Aseeva R.M., Serkov B.B., Sivenkov A.B. *Fire behavior and fire protection in timber buildings*. Germany, Springer Series in Wood Science, 2014; 280. DOI: 10.1007/978-94-007-7460-5
32. Boldyrev A.S., Zolotov P.P., Lyusov A.N., Kabanov N.P., Filippovich N.I. *Building materials : a Handbook*. A.S. Boldyreva (ed.). Moscow, Stroyizdat Publ., 1989; 567. (rus).
33. Yakovlev A.Ya. *Calculation of fire resistance of building structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1988; 143. (rus).
34. Wang L., Dong Y., Zhang D., Zhang D. and Zhang C. Experimental study of heat transfer in intumescent coatings exposed to non-standard furnace curves. *Fire Technology*. 2015; 51(3):627-643. DOI: 10.1007/s10694-015-0460-7
35. Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y. Fire resistance of timber panel structures under standard fire exposure. *Fire Technology*. 2016; 52(4):1015-1034. DOI: 10.1007/s10694-016-0578-2

*Поступила 08.10.2021, после доработки 01.11.2021;
принята к публикации 18.11.2021*

*Received October 8, 2021; Received in revised form November 1, 2021;
Accepted November 18, 2021*

Информация об авторах

ПУЗАЧ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

ЕРЕМИНА Татьяна Юрьевна, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

КОРОЛЬЧЕНКО Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, заведующий кафедрой комплексной безопасности в строительстве, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26; РИНЦ ID: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey V. PUZACH, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 18265; ResearcherID: U-2907-2019; Scopus Author ID: 7003537835; ORCID: 0000-0001-7234-1339; e-mail: puzachsv@mail.ru

Tatyana Yu. EREMINA, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 274777; ORCID: 0000-0003-1427-606X; e-mail: main@stopfire.ru

Dmitriy A. KOROLCHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Head of Department of Integrated Safety in Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavl'skoe Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RISC: 352067; Scopus Author ID: 55946060600; ResearcherID: E-1862-2017; ORCID: 0000-0002-2361-6428; e-mail: KorolchenkoDA@mgsu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком группы мазутных резервуаров

Сергей Александрович Швырков, Ян Игоревич Юрьев ✉,
Анатолий Павлович Петров, Владимир Петрович Назаров

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Согласно ГОСТ Р 53324–2009 для полного удержания разливающегося потока жидкости при разрушении резервуара может устанавливаться ограждающая стена с волноотражающим козырьком, которая должна быть сплошной по периметру, выполняться из негорючих материалов и иметь предел огнестойкости не менее E 150. Как правило, для строительства таких преград используют разновидности тяжелого бетона. Однако фактический предел огнестойкости конструкции зависит как от ее геометрических параметров, так и от теплотехнических характеристик и прочностных свойств применяемого вида бетона в условиях длительного воздействия углеводородного режима пожара. Работа посвящена расчетной оценке фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком из тяжелого бетона для группы резервуаров, входящих в состав мазутного хозяйства теплоэлектроцентрали.

Методика расчета и полученные результаты. Используя результаты исследований по обоснованию углеводородного режима пожара пролива горючей жидкости при разрушении резервуара, эмпирические зависимости для определения теплотехнических параметров тяжелого бетона, а также экспериментальные данные по изменению прочности бетона на сжатие при температурах до 1200 °С, выполнен расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком для группы мазутных резервуаров. Результаты расчетов показали, что принятая проектом конструкция преграды способна сохранять устойчивость более 10 ч. При этом несущая способность стены более чем в 11 раз превышает изгибающий момент от нормативной нагрузки, то есть огнестойкость преграды не менее RE 600, что в 4 раза превышает нормативный показатель для таких типов ограждений.

Выводы. Для расчета фактического предела огнестойкости ограждающих стен резервуарных парков хранения нефти и нефтепродуктов может быть использован общий алгоритм расчета, приведенный в СП 468.1325800.2019, при этом в качестве исходных данных рекомендуются к использованию результаты указанных выше теоретических и экспериментальных исследований.

Ключевые слова: резервуарный парк; углеводородный пожар; тяжелый бетон; преграда; несущая способность; целостность

Для цитирования: Швырков С.А., Юрьев Я.И., Петров А.П., Назаров В.П. Расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком группы мазутных резервуаров // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 73–86. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.73-86

✉ Юрьев Ян Игоревич, e-mail: magistr-87@list.ru

The analysis of the fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor as the protection for a group of fuel oil tanks

Sergey A. Shvyrkov, Yan I. Yuryev ✉, Anatoliy P. Petrov, Vladimir P. Nazarov

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. An enclosing wall with a wave-resisting visor may be installed to resist the flow of a liquid spill during a tank collapse in accordance with GOST R 53324-2009. This wall should be continuous along the perimeter; it must be made of incombustible materials and have the fire-resistance limit of not less than E 150.

As a rule, varieties of heavy concretes are used to construct these walls. However, the actual fire-resistance limit of a structure depends on both its geometric parameters, thermal characteristics and strength properties of concrete used in the case of the long-term exposure to the hydrocarbon fire regime. The work addresses the assessment of the actual fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor made of heavy concrete designed as the protection for a group of tanks at fuel oil facilities of a thermal power plant.

Calculation methodology and results. The calculation of the actual fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor, designated for a group of fuel oil tanks was performed. The co-authors used the results of studies on the substantiation of a hydrocarbon fire resulting from a flammable liquid spill and a tank failure, empirical dependences for determining the thermal engineering parameters of heavy concrete, as well as experimental data on a change in the compressive strength of concrete at temperatures up to 1,200 °C. The calculation results show that this wall structure can maintain stability for more than 10 hours. Note that the load-bearing capacity of the wall is more than 11 times greater than the bending moment triggered by the standard load. Indeed, the fire resistance of the wall is not less than *RE* 600. It exceeds the normative values for these types of walls by a factor of four.

Conclusions. A common algorithm can be used to calculate the actual fire-resistance limit of enclosing walls of oil and petroleum product tank storage facilities, set by Construction Regulations 468.1325800.2019. At the same time, the results of the above theoretical and experimental studies are recommended for use as the initial data.

Keywords: tank farm; hydrocarbon fire; heavy concrete; barrier; bearing capacity; integrity

For citation: Shvyrkov S.A., Yuryev Ya.I., Petrov A.P., Nazarov V.P. The analysis of the fire resistance limit of an enclosing wall with a wave-resisting visor as the protection for a group of fuel oil tanks. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*, 2021; 30(6):73-86. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.73-86 (rus).

✉ Yan Igorevich Yuryev, e-mail: magistr-87@list.ru

Введение

В последнее десятилетие развитие транспортной системы в столице проводится активными темпами. Существенно увеличилась дорожная сеть, выросла протяженность линий московского метро, построены новые хорды и рокады. Однако интенсификация дорожного строительства в городских условиях осложняет обеспечение пожарной безопасности как строящихся, так и рядом расположенных объектов. При этом наиболее часто возникают вопросы, связанные с сокращением противопожарных разрывов между указанными объектами защиты, что требует разработки дополнительных компенсирующих мероприятий. Так, в частности, при строительстве Северо-Восточной хорды (СВХ) возникла проблема сближения ряда транспортных развязок эстакадного типа с вертикальными стальными резервуарами (РВС) теплоэлектроцентрали ТЭЦ-11, предназначенными для хранения мазута и подготовки его к сжиганию [1].

Важно отметить, что резервуарные парки относятся к объектам повышенной пожаровзрывоопасности, что обусловлено, в первую очередь, высокой вероятностью выхода горючей жидкости при аварии или пожаре РВС. При этом аварии РВС в населенных пунктах или при их расположении вблизи акваторий всегда приводят к значительному ущербу и часто сопровождаются травмами, а порой, и гибелью людей, если заранее не предусмотрены адекватные опасности защитные мероприятия [2–4]. В качестве подтверждения можно привести негативные последствия разрушения РВС с дизельным топливом на ТЭЦ в г. Норильске, сопровождавшиеся

объявлением чрезвычайной ситуации и приведшие к ущербу в более чем 100 млрд руб. [5].

Таким образом, в связи с возникшими частичными сокращениями противопожарных разрывов от рассматриваемых резервуаров ТЭЦ-11 до проектируемых участков автомагистрали специалистами Академии ГПС МЧС России предложено в качестве компенсирующего мероприятия взамен земляного обвалования группы резервуаров обустроить монолитную железобетонную ограждающую стену с волноотражающим козырьком.

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 53324–2009 «Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности»¹ такая преграда должна рассчитываться на гидродинамическое давление потока жидкости, быть замкнутой и иметь предел огнестойкости не меньше *E* 150. Известно, что под пределом огнестойкости строительной конструкции понимается промежуток времени от начала огневого испытания при стандартном температурном режиме пожара до наступления одного из нормированных для данной конструкции предельных состояний по огнестойкости. В связи с этим, возникает вопрос о корректности применения для определения предела огнестойкости рассматриваемой конструкции преграды стандартного метода испытаний, так как температурный режим пожара пролива горючей жидкости при разрушении РВС имеет ряд существенных отличий от стандартного температурного режима пожара. В частности, среднеповерхностная температура пламени боль-

¹ ГОСТ Р 53324–2009. Ограждения резервуаров. Требования пожарной безопасности: утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 18 февраля 2009 г. № 100-ст.

шинства горючих жидкостей — 1200 °С, быстрый рост температуры пожара за счет сгорания значительного количества нагрузки и поддержание ее до полного выгорания разлитой горючей жидкости, пожар в границах ограждения с постоянным и неограниченным доступом кислорода, непосредственное воздействие пламени пожара на преграду [6]. При этом важно указать, что в мировой практике нашли широкое применение температурные режимы пожаров, существенно отличающиеся от стандартного температурного режима пожара [7–17].

В связи с вышесказанным, для расчетного определения фактического предела огнестойкости предложенной конструкции преграды, что и являлось целью настоящей статьи, ранее были выполнены комплексные исследования, в результате которых определены теплотехнические и прочностные характеристики рассматриваемых видов бетона в условиях воздействия «реального» пожара, характерного для горения горючей жидкости при разрушении РВС [6, 18–20].

Используя указанные результаты исследований для достижения поставленной в настоящей статье цели, решались следующие задачи:

- выполнение расчета огнестойкости ограждения по потере целостности;
- выполнение расчета огнестойкости ограждения по несущей способности;
- получение зависимости несущей способности ограждающей стены и изгибающего момента от различной продолжительности воздействия углеводородного режима пожара;
- сравнение полученного значения фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком с нормативным значением для ограждений резервуарных парков.

Расчетные методы и результаты решений

Геометрические размеры ограждения в зависимости от длины вылета волноотражающего козырька рассчитывались по методу, приведенному в приложении А ГОСТ Р 53324–2009, а параметры его устойчивости к воздействию потока жидкости на основе численного решения уравнений гидродинамики, постановка задач и частные случаи которых рассмотрены в [4].

Для определения фактического предела огнестойкости ограждения применялась методика, изложенная в СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности»², с учетом резуль-

татов ранее выполненных исследований [4, 6, 18–20], включающих:

- обоснование углеводородного режима пожара (УРП) пролива топлива при квазимгновенном разрушении резервуара;
- нахождение соотношений для оценки теплотехнических параметров тяжелого бетона с наполнителем из гранитной крошки, торкрет-бетона и фиброторкрет-бетона со стальной фиброй в условиях УРП;
- получение опытных данных по кубической и призмочной прочности исследуемых образцов бетона в условиях УРП;
- построение графических зависимостей для оценки температуры в слое конструкции ограждения различной толщины при одностороннем воздействии УРП до 10 ч.

На рис. 1 показано техническое решение защитного ограждения.

Принятые допущения:

1) толщина стены по всей высоте принята по наименьшему проектному значению, равному 1000 мм;

2) при оценке огнестойкости не учитывалось воздействие на стену гидростатического давления от разлившегося в границах ограждения мазута на высоте 2,02 м при разрушении РВС № 1, поскольку в соответствии с данными, представленными в [21], это давление ($P_{ст} = 0,196 \cdot 10^5$ Па) в шесть раз меньше гидродинамического давления мазута ($P_{гд} = 1,254 \cdot 10^5$ Па), действующего на этой высоте на стену при полном разрушении указанного резервуара:

- площадь внутри обвалования группы резервуаров: $S_{об} = 12\,582,04$ м²;
- высота стенки РВС № 1–3: $H_{ст,р1} = H_{ст,р2} = H_{ст,р3} = 17,88$ м;
- диаметр РВС № 1–3: $D_{р1} = D_{р2} = 39,9$ м; $D_{р3} = 28,5$ м;
- максимальный уровень мазута в РВС № 1–3: $H_{жр1} = H_{жр2} = H_{жр3} = 17,25$ м;
- площадь зеркала поверхности мазута в РВС № 1–3: $S_{р1} = S_{р2} = 1249,73$ м²; $S_{р3} = 637,62$ м²;
- объем мазута в РВС № 1–3: $V_{р1} = V_{р2} = 21\,557,81$ м³; $V_{р3} = 10\,998,88$ м³;
- плотность мазута: $\rho_m = 960$ кг/м³;
- площадь разлива мазута в обваловании: $S_p = S_{об} - S_{р2} - S_{р3} = 10\,694,69$ м²;
- максимальный уровень мазута, разлившегося при разрушении РВС № 1: $H_{ж\,max} = V_{р1}/S_p = 2,02$ м.

Расчет огнестойкости ограждения по потере целостности

В СП 468.1325800.2019, а также в [22] указано, что при пожаре в железобетонных конструкци-

² Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности (СП 468.1325800.2019) : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 10 декабря 2019 г. № 790/пр и введен в действие с 11 июня 2020 г.

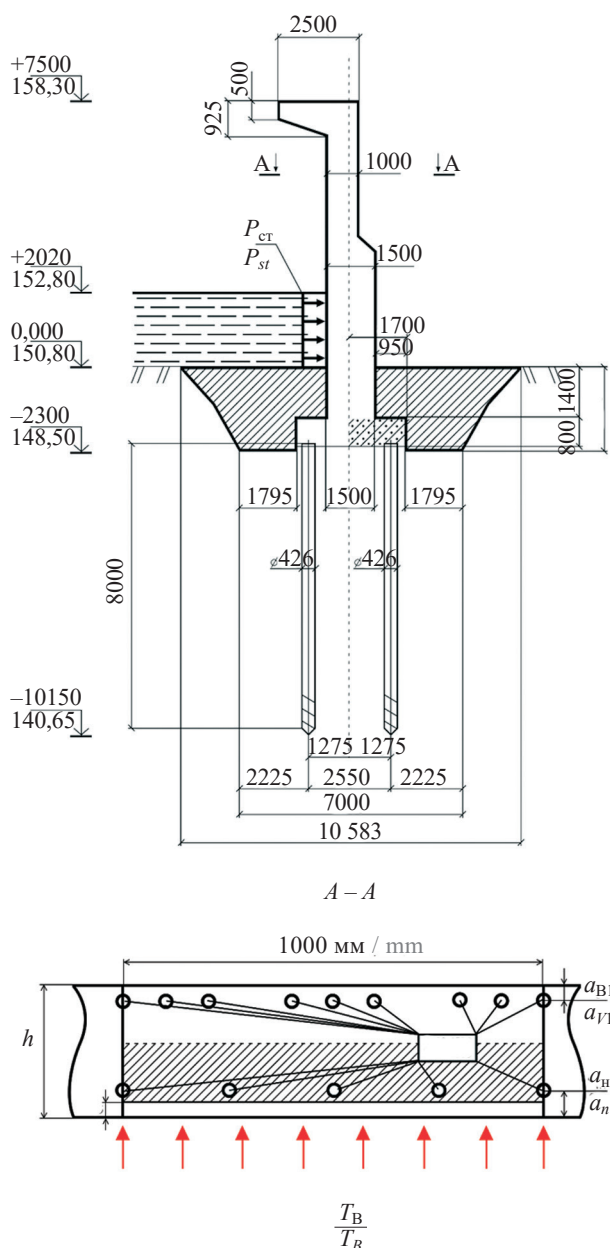


Рис. 1. Техническое решение защитной стены

Fig. 1. Technical solution for a protective wall

ях, влажность которых превышает 3,5 %, возможно взрывообразное разрушение бетона. Как правило, через 5...20 мин после начала пожара в таких конструкциях образуются сквозные отверстия или трещины, которые сопровождаются отколами бетона от нагреваемой поверхности. Причина этого явления заключается в образовании трещин в структуре бетона и их переход в неравновесное спонтанное развитие под воздействием внешней нагрузки и неравномерного нагрева и фильтрации пара по толщине сечения элемента.

Для оценки возможности разрушения бетона при пожаре используется критерий хрупкого разрушения F , вычисляемый по формуле, приведенной

в СП 468.1325800.2019, входящие в которую параметры даны в табл. 1:

$$F = \frac{aa_{bt}E_{bt}\rho W_3}{K_1^1 \lambda n}. \quad (1)$$

При значениях $F > 4$ хрупкое разрушение бетона при пожаре возможно, при этом предел огнестойкости по потере целостности не будет превышать Е 15.

Известно, что максимальный процент влажности бетон имеет при эксплуатации во влажных условиях, а также в ближайшие 3-4 недели после изготовления из него строительной конструкции. Используя формулу (1), определим критерий F для рассматриваемой конструкции ограждения в первый месяц влажного твердения бетона при относительной влажности воздуха более 73 %.

В соответствии с СП 468.1325800.2019 для бетона с соотношением Вода/Цемент $\geq 0,4$: $n = \text{Цемент}(\text{Вода/Цемент} - 0,2) \cdot 10^{-3}$ (табл. 2).

Объемная эксплуатационная влажность бетона при принятых условиях определяется по формуле:

$$W_3 = W_b \rho 10^{-3}, \quad (2)$$

где W_b — равновесная влажность бетона, принимаемая по СП 468.1325800.2019; для рассматриваемого случая численное значение $W_3 = 0,065$. Тогда

$$F = \frac{1,16 \cdot 10^{-2} \cdot 8,25 \cdot 10^{-6} \cdot 2,16 \cdot 10^{-4} \cdot 2220 \cdot 0,065}{0,58 \cdot 0,94 \cdot 0,105} = 5,21.$$

Вследствие того, что расчетное значение критерия $F > 4$, сделан вывод о возможном хрупком разрушении бетона в конструкции ограждающей стены в течение первых 20 мин ее прогрева на пожаре. Кроме этого, в СП 468.1325800.2019 указано, что в строительных конструкциях толщиной не менее 200 мм может произойти отбойка бетонных кусков до 100 мм, что сопровождается снижением толщины конструкции. Данное явление может иметь место и в рассматриваемой конструкции ограждающей стены с минимальным проектным сечением 1000 мм. Поэтому в дальнейшем оценка огнестойкости рассматриваемого ограждения с учетом снижения его толщины на 100 мм должна выполняться по потере несущей способности вследствие того, что сначала наступает предел огнестойкости по R, а затем по E.

Расчет огнестойкости ограждения по несущей способности

В расчете параметры волноотражающего козырька были неизменными. Данные для расчета приведены в табл. 3.

Таблица 1. Параметры для определения критерия хрупкого разрушения

Table 1. Parameters for the Criterion of Brittle Fracture

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Плотность сухого бетона Density of dry concrete	ρ , кг/м ³ ρ , kg/m ³	2220,0
Объемная эксплуатационная влажность бетона Volumetric operating humidity of concrete	W_3 , м ³ /м ³ W_v , m ³ /m ³	0,065
Коэффициент псевдоинтенсивности напряжений бетона Coefficients of pseudo-intensity of concrete stresses	K_I^1 , МН·м ^{-3/2} K_I^1 , MN·m ^{-3/2}	$0,58 \cdot 10^3$
Пористость бетона Concrete porosity	N	0,105
Коэффициент теплопроводности бетона при температуре 250 °С Coefficient of thermal conductivity of concrete at a temperature of 250 °C	λ , Вт/(м·°С) λ , W/(m·°C)	0,94
Модуль упругости бетона Modulus of elasticity of concrete	E_{bt} , МН/м ² E_{bt} , MN/m ²	$21,6 \cdot 10^3$
Коэффициент температурной деформации Temperature deformation coefficient	α_{bt} , °С ⁻¹ α_{bt} , °C ⁻¹	$8,25 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент пропорциональности Coefficient of proportionality	a , Вт·м ^{-3/2} ·кг a , W·m ^{-3/2} ·kg	$1,16 \cdot 10^{-2}$

Таблица 2. Параметры бетонной смеси

Table 2. Concrete mixture parameters

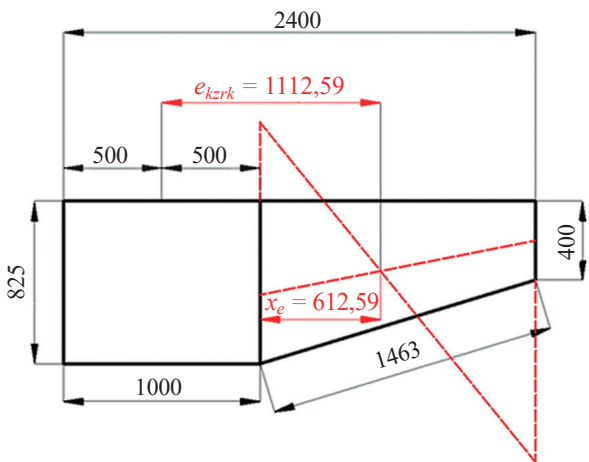
Плотность бетона, кг/м ³ Concrete density, kg/m ³		Состав бетонной смеси, кг/м ³ Concrete mixture composition, kg/m ³					Вода/Цемент Water/Cement	Класс бетона Class concrete	Щебень, % Crushed stone %
Сухого Dry	Естественной влажности Natural humidity	Песок Sand	Цемент Cement	Вода Water	Щебень Crushed stone	Микро-кремнезем Microsilica			
2220	2370	700	400	185	1030	55	0,46	B40	0,43

Таблица 3. Параметры волноотражающего козырька

Table 3. Oscillating visor parameters

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Высота стены от поверхности жидкости до козырька Height of the wall from the liquid surface to the visor	h^l , м h^l , m	0,9
Ширина расчетного участка стены Width of calculated wall section	Δb , м Δb , m	1,0
Высота стены (до козырька) Height of wall (to visor)	h , м h , m	4,48
Высота стены с козырьком выше поверхности жидкости Height of the visor wall above the liquid surface	H , м H , m	5,48
Ширина участка стены (при расчете e_{krk} принято $d = 1,0$ м) Width of wall section ($d = 1.0$ m was assumed for e_{krk} calculation)	d , м d , m	0,9

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Армирование стены Wall reinforcement		
Расстояние от оси арматуры до края необогреваемой части стены The distance from the reinforcement rod axis to the edge of the unheated part of the wall	$a_{в1}$, мм a_{v1} , mm	90,0
Количество арматуры в верхней части Number of reinforcement rods in the upper part	$N_{в}$, шт. N_v , pcs.	9
Расстояние от оси арматуры до края обогреваемой части стены The distance from the axis of reinforcement rods to the edge of the heated part of the wall	$a_{н1}$, мм a_{n1} , mm	90,0
Количество арматуры в одном ряду в нижней части The number of reinforcement rods in one row in the bottom part	$N_{н}$, шт. N_n , pcs.	5
Диаметр стержней верхней арматуры The diameter of upper reinforcement rods	$d_{в}$, мм d_v , mm	28,0
Диаметр стержней нижней арматуры The diameter of bottom reinforcement rods	$d_{н}$, мм d_n , mm	28,0
Плотность бетона Concrete density	ρ_t , кг/м ³ ρ_t , kg/m ³	2370,0
Начальная температура Initial temperature	$T_{и}$, °C T_n , °C	20,0
Расчетная длина козырька Estimated length of the visor	L_{kzrk} , м L_{kzrk} , m	2,4
Расчетная толщина козырька стены Estimated thickness of the wall visor	B_{kzrk} , м B_{kzrk} , m	0,4
Давление от веса стенки: $P_{g,stk} = \Delta b h h' 10 \rho_t$ Pressure from the weight of the wall: $P_{g,stk} = \Delta b h h' 10 \rho_t$	$P_{g,stk}$, Н $P_{g,stk}$, N	95 558,4
Высота козырька Visor height	H_{kzrk} , м H_{kzrk} , m	0,825
Давление от козырька Pressure from the visor	$P_{g,kzrk}$, Н $P_{g,kzrk}$, N	21 774,38
Давление от стены Pressure from the wall	$P_{g,total}$, Н $P_{g,total}$, N	117 332,775
Эксцентриситет приложения нагрузки от веса козырька: $e_{kzrk} = x_e + \left(\frac{d \cdot 1000}{2} \right)$ Eccentricity of the load application from the weight of the visor: $e_{kzrk} = x_v + \left(\frac{d \cdot 1,000}{2} \right)$	e_{kzrk} , мм e_{kzrk} , mm	1112,59
Расстояние от центра тяжести козырька до стенки The distance from the centre of gravity of the visor to the wall	x_e , мм x_v , mm	612,59

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
 Расчетная схема центра тяжести волноотражающего козырька ограждающей стены The design scheme of the centre of gravity of the wave-resisting visor of the enclosing wall		
Изгибающий момент от веса козырька: $M_{kzrk} = P_{g,kzrk} e_{kzrk}$ The bending moment from the weight of the visor: $M_{kzrk} = P_{g,kzrk} e_{kzrk}$	M_{kzrk} , кНм M_{kzrk} , kNm	24,23
Модуль упругости арматуры (холодной) Modulus of elasticity of the reinforcement (cold)	E_s , МПа E_s , MPa	$2 \cdot 10^5$
Заполнитель Filler	Гранитная крошка Granite particles	
Предел прочности бетона Limit strength of concrete	R_{bn} , МПа R_{bn} , MPa	29,0
Модуль упругости (начального) бетона Modulus of elasticity of concrete (initial)	E_b , МПа E_b , MPa	$36 \cdot 10^3$
Влажность бетона Concrete humidity	W_6 , % W_c , %	3,0
Предел прочности арматуры Limit strength of reinforcement	R_{sn} , МПа R_{sn} , MPa	500,0
Коэффициент заделки опор [23] Pillar embedding coefficient [23]	a	2,0
	α	0,85
Действующая нагрузка: $N_n = P_{g,tot} \cdot 10^{-3}$ Operating load: $N_n = P_{g,tot} \cdot 10^{-3}$	N_n , кН N_n , kN	117,33
Высота конструкции (принято $l_0 = H\mu$) Construction height (accepted $l_0 = H\mu$)	l_0 , м l_0 , m	10,96
Коэффициент расчетной длины Design length coefficient	μ	2,0
Параметры в зависимостях: Parameters in dependencies: $A_{sn1} = N_n \pi \frac{d_n^2}{4}$ $A_{sb} = N_b \pi \frac{d_b^2}{4}$	мм ² mm ²	3078,8
	мм ² mm ²	5541,8
Время прогрева Warm-up time	T , мин T , min	150

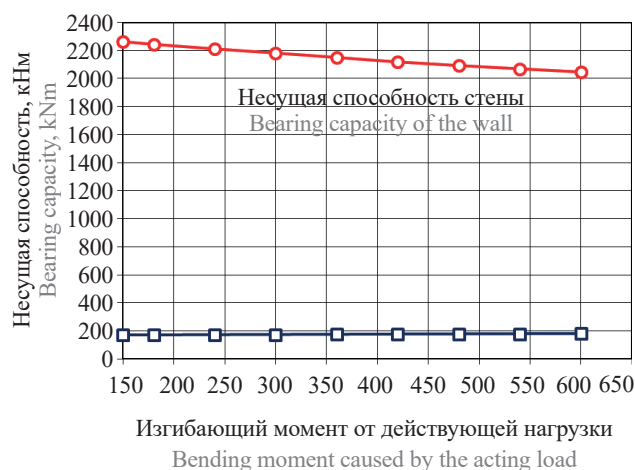


Рис. 2. Несущая способность и изгибающий момент ограждающей стены в зависимости от продолжительности огневого воздействия при пожаре разлива мазута (толщина стены — 900 мм, диаметр арматуры А500 — 28 мм)

Fig. 2. The bearing capacity and bending moment in an enclosing wall as a function of the time of fire exposure in case of a fuel oil spill fire (wall thickness — 900 mm, rebar diameter A500 — 28 mm)

Таблица 4. Решения теплотехнической и прочностной задач
Table 4. Solutions of heat and strength problems

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Теплотехническая задача Thermal engineering task		
Теплофизические характеристики бетона при температуре Thermophysical characteristics of concrete at temperature	$T, ^\circ\text{C}$	450,0
Коэффициент теплопроводности, определяемый по [21] Thermal conductivity coefficient determined by [21]	$\lambda_{tem}, \text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$ $\lambda_{tem}, \text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$	0,885
Приведенный коэффициент температуропроводности: $a_{red} = \frac{\lambda_{tem}}{(c_{tem} + 50W)\rho_0}$ The reduced thermal conductivity coefficient: $a_{red} = \frac{\lambda_{tem}}{(c_{tem} + 50W)\rho_0}$	$a_{red}, \text{мм}^2/\text{с}$ $a_{red}, \text{mm}^2/\text{s}$	0,28
Коэффициент фиктивного слоя бетона [23] The coefficient of the fictitious concrete layer [23]	$K_b, \text{с}^{1/2}$ $K_b, \text{s}^{1/2}$	36,32
Удельная теплоемкость Specific heat capacity	$c_{tem}, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ $c_{tem}, \text{J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	1292,02
Параметр $2\sqrt{a_{red}\tau}$ Parameter $2\sqrt{a_{red}\tau}$	мм mm	99,76
Толщина фиктивного слоя бетона: $K_b\sqrt{a_{red}}$ Thickness of fictitious concrete layer: $K_b\sqrt{a_{red}}$	мм mm	19,10
Ожидаемая температура прогрева бетона Anticipated temperature of concrete heating	$t_{bcr}, ^\circ\text{C}$	500,0

Несущая способность конструкции определяется на основе теплотехнической и прочностной задач, решения которых приведены в табл. 4.

В результате выполненных расчетов получены зависимости несущей способности ограждающей стены и изгибающего момента от различной продолжительности огневого воздействия, общий вид которых показан на рис. 2.

Общий вид преграды в резервуарном парке ТЭЦ-11 на стадии строительства представлен на рис. 3.



Рис. 3. Общий вид ограждения со стороны ПВС № 3

Fig. 3. General view of the enclosure as viewed from Vertical steel tank 3

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
Температура арматуры на уровне a_b The reinforcement temperature at level a_v	$t_{s2}, ^\circ\text{C}$	20,0
Температура арматуры на уровне a_n The reinforcement temperature at level a_n	$t_{s1}, ^\circ\text{C}$	1250,0
Обогреваемая температура бетона на поверхности Heated concrete surface temperature	$t_{b_hot}, ^\circ\text{C}$	1250,0
Необогреваемая температура бетона на поверхности Unheated concrete surface temperature	$t_{b_cold}, ^\circ\text{C}$	20,0
Усредненная температура бетона: $t_{btem} = \frac{t_{b_cold} + t_{b_hot}}{2}$ Averaged concrete temperature: $t_{btem} = \frac{t_{b_cold} + t_{b_hot}}{2}$	$t_{btem}, ^\circ\text{C}$	635,0
Толщина ненесущего слоя бетона Thickness of non-load-bearing concrete layer	$\delta, \text{мм}$ δ, mm	66,96
Критическая температура прогрева бетона Critical heating temperature of concrete	$t_{bcr}, ^\circ\text{C}$	500,0
Прочностная задача (арматура А500 на уровне a_b) Strength task (reinforcement A500 at a_v level)		
Коэффициент снижения модуля упругости бетона необогреваемой поверхности Coefficient of reduction of the modulus of elasticity of concrete of the unheated surface	β_{bt}	0,165
Коэффициент снижения прочности А500 A500 Strength reduction coefficient	γ_2	1,0
Коэффициент снижения модуля упругости А500 Coefficient of reduction of modulus of elasticity А500	β_{s2}	1,0
Коэффициент температурного расширения бетона Coefficient of thermal expansion of concrete	$\alpha_{bt}, 1/^\circ\text{C}$	$9 \cdot 10^{-6}$
Предел прочности А500 при пожаре: $R_{su2} = \gamma_2 R_{sn}$ A500 strength limit in case of fire: $R_{su2} = \gamma_2 R_{sn}$	$R_{su2}, \text{МПа}$ R_{su2}, MPa	500,0
Параметры приведенного сечения стены Parameters of the reduced wall section		
$h_{0t} = 1000d - a_b - \delta$ $h_{0t} = 1,000d - a_v - \delta$	$h_{0t}, \text{мм}$ h_{0t}, mm	833,04
Гибкость элемента: $\lambda = l_0/h_t$ Element flexibility: $\lambda = l_0/h_t$	λ	13,16
$h_0 = 1000d - a_b$ $h_0 = 1,000d - a_v$	$h_0, \text{мм}$ h_0, mm	900,0
$M_{11} = M_{kzrk}$	кНм kNm	24,23
$M_1 = M_{11}$	кНм kNm	24,23
$b_t = \Delta b$	$b_t, \text{мм}$ b_t, mm	1000,0

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
$h_t = 1000d - \delta$	h_t , мм h_t , mm	833,04
Коэффициент продольного изгиба: $\varphi_1 = 1 + M_{11}/M_1$ Longitudinal bending coefficient: $\varphi_1 = 1 + M_{11}/M_1$	φ_1	2,0
Эксцентриситет: $e_0 = 1000M_{11}/N_n$ Eccentricity: $e_0 = 1,000M_{11}/N_n$	e_0 , мм e_0 , mm	206,47
$\delta_e = \max\left(\frac{e_0}{h_t}; 0,15\right)$	δ_e , мм δ_e , mm	0,25
$\mu\alpha = \frac{A_{sy1}E_s + A_{sb}E_s\beta_{s2}}{b_t h_t E_b \beta_{bt}}$	$\mu\alpha$	0,35
Жесткость сечения: $D = E_b \beta_{bt} b_t h_t^3 \left(\frac{0,0125}{\varphi_1(0,3 + \delta_e)} + 0,175\mu\alpha \left(\frac{h_{0t} - a_d}{h_t} \right)^2 \right)$ Section rigidity: $D = E_b \beta_{bt} b_t h_t^3 \left(\frac{0,0125}{\varphi_1(0,3 + \delta_e)} + 0,175\mu\alpha \left(\frac{h_{0t} - a_d}{h_t} \right)^2 \right)$	D , Н·мм ² D , N·mm ²	$2,48 \cdot 10^{14}$
Критическая сила: $N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{1000(1000l_0)^2}$ Critical force: $N_{cr} = \frac{\pi^2 D}{1,000(1,000l_0)^2}$	N_{cr} , кН N_{cr} , kN	20 421,83
$\eta = 1/(1 - N_n/N_{cr})$	η	1,0057
Прогиб стены: $e_t = a(\alpha_{s1}t_{s1} - \alpha_{bt}t_{b_cold}) \frac{(l_0 1000)^2}{8h_{0t}}$, где $a = 2$ — коэффициент заделки Wall deflection: $e_t = a(\alpha_{s1}t_{s1} - \alpha_{bt}t_{b_cold}) \frac{(l_0 1,000)^2}{8h_{0t}}$, where $a = 2$ — embedding factor	e_t , мм e_t , mm	793,35
Эксцентриситет: $e = e_0\eta + 0,5(h_0 - a_{n1}) + e_t$ Eccentricity: $e = e_0\eta + 0,5(h_0 - a_{n1}) + e_t$	e , мм e , mm	1451,02
Момент от нагрузки (продолжительность 150 мин): $M_n = N_n \cdot e/1000$ Momentum caused by the load (duration 150 min): $M_n = N_n \cdot e/1,000$	M_n , кНм M_n , kNm	170,25
Предполагаем: (x) — высота сжатой зоны меньше предельного значения, тогда: We assume: (x) — the height of the compressed zone is less than the limit value, then:		
Высота сжатой зоны: $x = \frac{N_n \cdot 10^3 + R_{su2}A_{sv} - R_{su1}A_{sn1}}{R_{bn}b}$ Height of the compressed zone: $x = \frac{N_n \cdot 10^3 + R_{su2}A_{sv} - R_{su1}A_{sn1}}{R_{bn}b}$	x , мм x , mm	99,59

Параметр Parameter	Обозначение, размерность Symbol, dimension	Значение Value
$\xi = x/h_{0t} = 0,119$; $\xi_{R2} = 0,49$ — относительная высота сжатой зоны $\xi = x/h_{0t} = 0,119$; $\xi_{R2} = 0,49$ — relative height of the compressed zone		
Так как условие $\xi < \xi_{R2}$ выполняется, пересчитывать x не требуется, предположение верно Since the condition $\xi < \xi_{R2}$ is satisfied, it is not necessary to recalculate x , the assumption is correct		
Несущая способность стены при продолжительности пожара 150 мин: $M = (R_{bn} b_t x (h_{0t} - 0,5x) + R_{sn} \gamma_1 A_{sn1} (h_{0t} - a_{n1})) \cdot 10^{-6}$ The bearing capacity of the wall during the fire is 150 min: $M = (R_{bn} b_t x (h_{0t} - 0,5x) + R_{sn} \gamma_1 A_{sn1} (h_{0t} - a_{n1})) \cdot 10^{-6}$	M , кНм M , kNm	2262,17
Действующая нагрузка Operating load	M_n , кНм M_n , kNm	170,25

Выводы

В статье, используя результаты ранее выполненных исследований по определению теплотехнических параметров и прочностных характеристик различных видов бетонов в условиях углеводородного режима пожара, представлены итоги расчета фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком для группы мазутных резервуаров

ТЭЦ-11 г. Москвы. Расчеты показали, что принятая проектом конструкция ограждающей стены способна сохранять конструктивную целостность и функциональное назначение при длительном воздействии пожара пролива мазута, то есть огнестойкость рассматриваемой преграды составляет не менее RE 600, что в 4 раза превышает нормируемое значение для ограждений резервуарных парков (не менее E 150).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Назаров В.П., Брушлинский Н.Н., Швырков С.А., Горячев С.А., Сучков В.П., Чирко А.С. Обеспечение пожарной безопасности объектов городской застройки при развитии транспортной инфраструктуры в области допустимого риска // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 1. С. 20–31.
2. Зарипова А.Р., Ганиева А.А., Колесник А.А. Анализ проблем прогнозирования разливов нефтепродуктов в резервуарных парках // Нефтегазовое дело. 2017. Т. 15. № 2. С. 192–196.
3. Владимиров В.А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. Т. 4. № 1. С. 217–229. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21490612>
4. Швырков С.А. Пожарный риск при квазимгновенном разрушении нефтяного резервуара : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2015. 289 с.
5. Зайцев А.М., Тульская С.Г., Скляр К.А. Причины и последствия аварии на складе ГСМ ТЭЦ 3 города Норильска // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. 2021. № 3 (24). С. 38–42.
6. Юрьев Я.И. Огнестойкость монолитных железобетонных ограждающих стен резервуарных парков : дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 152 с.
7. Stucchi R., Amberg F.A. A practical approach for tunnel fire verification // Structural Engineering International. 2020. No. 4. Vol. 30. Pp. 515–529. DOI: 10.1080/10168664.2020.1772697
8. Yan Zhi-guo, Shen Yi, Zhu He-hua, Li Xiao-jun, Lu Yong. Experimental investigation of reinforced concrete and hybrid fibre reinforced concrete shield tunnel segments subjected to elevated temperature // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 86–99. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.009
9. Yi Na-Hyun, Choi Seung-Jai, Lee Sang-Won, Kim Jang-Ho Jay. Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 123–133. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.010
10. Ingason Haukur, Zhen Li Ying, Lönnemark A. Runehamar tunnel fire tests // Fire Safety Journal. 2015. Vol. 71. Pp. 134–149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.015

11. Khan A.A., Usmani A., Torero J.L. Evolution of fire models for estimating structural fire-resistance // *Fire Safety Journal*. 2021. Vol. 124. P. 103367. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103367
12. Chudyba K. Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów (norm PN-EN) // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2016. Vol. 41. Issue 1. Pp. 85–96. DOI: 10.12845/bitp.41.1.2016.9
13. Doherty P., Ali F., Nadjai A., Choi S. Explosive spalling of concrete columns with steel and polypropylene fibres subjected to severe fire // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2012. Vol. 3. No. 1. Pp. 95–104. DOI: 10.1260/2040-2317.3.1.95
14. Siemon M., Zehfuß J. Behavior of structural tunnel elements exposed to fire and mechanical loading // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2018. Vol. 9. No. 2. Pp. 138–146. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0020
15. Shirsath S.K., Yaragal S.C. Performance of hybrid fibre-reinforced concretes at elevated temperatures // *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 73–83. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0007
16. Abdi Moghadam M., Izadifard R.A. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures // *Fire Safety Journal*. 2020. Vol. 113. P. 102978. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102978
17. Paik J.K., Czujko J. Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: Recent advances and future trends // *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*. 2016. Vol. 4. Pp. 167–179. DOI: 10.1080/19373260.2011.593345
18. Швырков С.А., Юрьев Я.И. Температурный режим пожара для определения предела огнестойкости ограждающих стен нефтяных резервуаров // *Технологии техносферной безопасности*. 2016. № 4. С. 50–56. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/20-04-16.ttb.pdf>
19. Швырков С.А., Петров А.П., Назаров В.П., Юрьев Я.И. Теплотехнические свойства бетона, торкрет-бетона и торкрет-фибробетона в условиях углеводородного пожара // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2016. Т. 25. № 12. С. 5–12. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5-12
20. Швырков С.А., Юрьев Я.И., Приступюк Д.Н. Результаты экспериментальных исследований прочностных характеристик различных типов бетона в условиях углеводородного пожара // *Технологии техносферной безопасности*. 2017. № 1. 6 с. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/16-01-17.ttb.pdf>
21. Крутов А.М. Экспериментально-расчетное определение основных параметров защитной стены для ограждения резервуарного парка мазутного хозяйства ТЭЦ-11, предназначенного для удержания потока мазута (волны прорыва), образующегося при квазимгновенном разрушении наибольшего резервуара группы (РВС-20000), в составе противопожарной защиты объекта, расположенного по адресу: г. Москва, участок 4-го транспортного кольца, ш. Энтузиастов – Измайловское ш., ул. Перовская, д.1А : отчет о НИР. Сергиев-Посад : ЗАО «Теплоогнезащита», 2007. 90 с.
22. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М. : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2001. 382 с.
23. Бубнов В.М., Карпов А.С. Огнестойкость железобетонных конструкций : учеб. пособие. М. : Академия ГПС МЧС России, 2009. 76 с.

REFERENCES

1. Nazarov V.P., Brushlinskij N.N., Shvyrkov S.A., Goryachev S.A., Suchkov V.P., Chirko A.S. Ensuring of fire safety of urban construction objects under the development of transport infrastructure in the domain of permissible risk. *Environmental protection in the oil and gas complex*. 2009; 1:20-31. (rus).
2. Zaripova A.R., Ganieva A.A., Kolesnik A.A. Analysis of prognostic problems of petroleum spreads in tank parks. *Petroleum Engineering*. 2017; 15(2):192-196. (rus).
3. Vladimirov V.A. Oil spills: causes, magnitude, consequences. *Civil Protection Strategy: Problems and Research*. 2014; 4(1):217-229. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21490-612> (rus).
4. Shvyrkov S.A. *Fire risk in case of quasi-instantaneous destruction of an oil tank : monograph*. Moscow, Academy of the state fire Service of emercom of Russia Publ., 2015; 289. (rus).

5. Zaytsev A.M., Tul'skaya S.G., Sklyarov K.A. Causes and consequences of the accident at the fuel and lubricants warehouse at CHPP 3 of the city of Norilsk. *Urban planning. Infrastructure. Communications*. 2021; 3(24):38-42. (rus).
6. Yur'yev Ya.I. *Fire and industrial safety (construction industry)*. Moscow, 2018; 152. (rus).
7. Stucchi R., Amberg F.A. A practical approach for tunnel fire verification. *Structural Engineering International*. 2020; 30(4):515-529. DOI: 10.1080/10168664.2020.1772697
8. Yan Zhi-guo, Shen Yi, Zhu He-hua, Li Xiao-jun, Lu Yong. Experimental investigation of reinforced concrete and hybrid fibre reinforced concrete shield tunnel segments subjected to elevated temperature. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:86-99. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.009
9. Yi Na-Hyun, Choi Seung-Jai, Lee Sang-Won, Kim Jang-Ho Jay. Failure behavior of unbonded bi-directional prestressed concrete panels under RABT fire loading. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:123-133. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.010
10. Ingason Haukur, Zhen Li Ying, Lönnemark A. Runehamar tunnel fire tests. *Fire Safety Journal*. 2015; 71:134-149. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.015
11. Khan A.A., Usmani A., Torero J.L. Evolution of fire models for estimating structural fire-resistance. *Fire Safety Journal*. 2021; 124:103367. DOI: 10.1016/j.firesaf.2021.103367
12. Chudyba K. Bezpieczeństwo pożarowe konstrukcji z betonu według eurokodów (norm PN-EN). *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza*. 2016; 41(1):85-96. DOI: 10.12845/bitp.41.1.2016.9 (pol).
13. Doherty P., Ali F., Nadjai A., Choi S. Choi Explosive spalling of concrete columns with steel and polypropylene fibres subjected to severe fire. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2012; 3(1):95-104. DOI: 10.1260/2040-2317.3.1.95
14. Siemon M., Zehfuß J. Behavior of structural tunnel elements exposed to fire and mechanical loading. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2018; 9(2):138-146. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0020
15. Shirsath S.K., Yaragal S.C. Performance of hybrid fibre-reinforced concretes at elevated temperatures. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2017; 8(1):73-83. DOI: 10.1108/JSFE-01-2017-0007
16. Abdi Moghadam Mehrdad, Ramezan Ali Izadifard. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Safety Journal*. 2020; 113:102978. DOI: 10.1016/j.firesaf.2020.102978
17. Paik J.K., Czujko J. Assessment of hydrocarbon explosion and fire risks in offshore installations: Recent advances and future trends. *IES Journal Part A: Civil and Structural Engineering*. 2016; 4:167-179. DOI: 10.1080/19373260.2011.593345
18. Shvyrvkov S.A., Yuryev Ya.I. The temperature of the fire to determine the limit of fire resistance of enclosing walls of oil tanks. *Tekhnologii tekhnosfernoi bezopasnosti: internet-zhurnal*. 2016; 4:50-56. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-4/20-04-16.ttb.pdf> (accessed July 07, 2021). (rus).
19. Shvyrvkov S.A., Petrov A.P., Nazarov V.P., Yuryev Ya.I. Thermophysical characteristic of concrete, shotcrete and fiber-reinforced shotcrete in conditions of hydrocarbon fire. *Pozharovzryvobezopasnost /Fire and Explosion Safety*. 2016; 25(12):5-12. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.12.5-12 (rus).
20. Shvyrvkov S.A., Yuryev Ya.I., Pristupyuk D.N. The results of experimental research of strength characteristics of various types of concrete in condition of hydrocarbon fire. *Technology of Technosphere Safety*. 2017; 1(71). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/16-01-17.ttb.pdf> (accessed July 07, 2021). (rus).
21. Krutov A.M. *Experimental and computational determination of the main parameters of the protective wall for fencing the tank farm of the fuel oil facility at CHPP-11, designed to contain the flow of fuel oil (breakthrough waves) formed during the quasiinstantaneous destruction of the largest reservoir of the group (RVS-20000), as part of the fire protection of the facility located at : Moscow, section of the 4th transport ring, sh. Enthusiasts — Izmailovskoe highway, st. Perovskaya, 1A : research report*. Sergiev Posad, ZAO "Teploognezashchita", 2007; 90. (rus).
22. Roytman V.M. *Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings*. Moscow, Association "Fire Safety and Science", 2001; 382. (rus).
23. Bubnov V.M., Karpov A.S. *Fire resistance of reinforced concrete structures : training manual*. Moscow, Academy of the state Fire Service of Emercom of Russia Publ., 2009; 76. (rus).

Поступила 08.07.2021, после доработки 13.10.2021;

принята к публикации 25.10.2021

Received July 8, 2021; Received in revised form October 13, 2021;

Accepted October 25, 2021

Информация об авторах

ШВЫРКОВ Сергей Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 765228; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: magistr-87@list.ru;

ЮРЬЕВ Ян Игоревич, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 765228; ORCID: 0000-0003-1429-679X; e-mail: magistr-87@list.ru;

ПЕТРОВ Анатолий Павлович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 765316; ORCID: 0000-0002-7757-1771; e-mail: setyn@list.ru;

НАЗАРОВ Владимир Петрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов в составе Учебно-научного комплекса пожарной безопасности объектов защиты, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

Вклад авторов

Швырков С.А. — научное руководство; концепция исследования; написание исходного текста; итоговые выводы.

Юрьев Я.И. — участие в разработке алгоритма вычислений; сбор материала, обработка материала, итоговые выводы.

Петров А.П. — научное редактирование текста; обобщение результатов; доработка текста; итоговые выводы.

Назаров В.П. — научное редактирование текста; обобщение результатов; доработка текста; итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors

Sergey A. SHVYRKOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 479363; ORCID: 0000-0001-7449-8794; e-mail: pbtp@mail.ru

Yan I. YURYEV, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 765228; ORCID: 0000-0003-1429-679X; e-mail: magistr-87@list.ru

Anatoliy P. PETROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 765316; ORCID: 0000-0002-7757-1771; e-mail: setyn@list.ru

Vladimir P. NAZAROV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Fire Safety of Technological Processes as part of the Educational and Scientific Complex of Fire Safety of Protection Objects, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 764644; ORCID: 0000-0001-8579-4062; e-mail: nazarovvp@bk.ru

Contribution of the authors

Sergey A. Shvyrkov — scientific guidance; research concept; writing the source text; final conclusions.

Yan I. Yuryev — participation in the development of the calculation algorithm; material collection, material processing, final conclusions.

Anatoliy P. Petrov — scientific editing of the text; generalization of the results; revision of the text; final conclusions.

Vladimir P. Nazarov — scientific editing of the text; generalization of the results; revision of the text; final conclusions.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 87–96
 POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):87-96
 НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК: 614.842.835+311.14

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.87-96>

О пожарной безопасности в сельской местности России

Николай Николаевич Брушлинский, Сергей Викторович Соколов✉,
 Маргарита Петровна Григорьева

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена обстановка с пожарами в сельской местности Российской Федерации и приведена оценка численности пожарной охраны для ее противопожарной защиты.

Целью исследования является анализ интегральных пожарных рисков и комплексного показателя пожарной опасности сельской местности в России и ее федеральных округах.

Объект исследования — обстановка с пожарами на территории Российской Федерации.

Предмет исследования — величины интегральных пожарных рисков в сельских населенных пунктах и оцениваемый на их основе комплексный показатель пожарной опасности сельской местности.

Методология. Методологической основой исследования является теория интегральных пожарных рисков.

Результаты и их обсуждение. В результате исследования было установлено, что значения основных интегральных рисков в сельской местности России в 2–3 раза выше, чем в городских поселениях. Аналогичные результаты наблюдаются и в других странах, в частности в США. Приведены значения исследуемых значений рисков для городских и сельских населенных пунктов США.

Выводы. Полученные в исследовании результаты могут быть использованы при решении проблем управления пожарной безопасностью в сельской местности. Установлен объективный уровень пожарной опасности в сельской местности федеральных округов России. Целесообразно провести аналогичное исследование обстановки с пожарами в сельской местности субъектов Российской Федерации.

Ключевые слова: пожарная опасность; статистика пожаров; интегральные пожарные риски; комплексный показатель; пожарно-спасательные подразделения

Для цитирования: Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П. О пожарной безопасности в сельской местности России // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 87–96. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.87-96

✉ Соколов Сергей Викторович, e-mail: albrus-ssv@yandex

On fire safety in rural areas of Russia

Nikolay N. Bruslinskiy, Sergey V. Sokolov✉, Margarita P. Grigorieva

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The article addresses the fire situation in rural areas of the Russian Federation and estimate the number of fire brigades that assure fire safety there. The purpose of the study is to analyze integral fire risks and a composite indicator of the fire hazard in Russia's rural areas and federal districts. The scope of research is the probability of fire occurrence in the territory of the Russian Federation. The focus of research encompasses values of integral fire risks in rural settlements and a composite rural fire hazard indicator, calculated using these values.

Methodology. The theory of integral fire risks serves as the methodological framework for the study.

Results and discussion. As a result of the study, it was found that the values of principal integral fire risks in rural areas of Russia are 2–3 times higher than those in urban areas. Similar results are obtained in other countries, in particular, in the United States. Values of the same fire risk are provided for urban and rural areas of the United States.

Conclusions. The results obtained in the study can be used to solve problems of fire safety management in rural areas. The objective level of the fire hazard in rural areas of Russian federal districts was identified. It is advisable to conduct a similar study of the fire situation in rural areas of subjects of the Russian Federation.

Keywords: fire hazard; fire statistics; integral fire risks; composite indicator; fire and rescue brigades

For citation: Bruslinskiy N.N., Sokolov S.V., Grigorieva M.P. On fire safety in rural areas of Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):87-96. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.87-96 (rus).

✉ Sergey Viktorovich Sokolov, e-mail: albrus-ssv@yandex

Введение

По данным Росстата в Российской Федерации¹ на 1 января 2021 г. численность населения составляла 146,2 млн чел., из которых 37,3 млн чел. (25,5 %) проживали в сельской местности.

Довольно часто в новостных программах средства массовой информации сообщают, что при пожаре частного дома в сельской местности погибли несколько человек, из которых большинство — дети. Многие погибают, так и не проснувшись, отравившись продуктами горения.

Как оценить реальную пожарную опасность в сельской местности России, где проживает четверть ее населения? И как обеспечить ее пожарную безопасность? Этому вопросу посвящена настоящая статья.

Основная часть

Сначала дадим самую общую оценку уровня пожарной опасности сельской местности (СМ) России. Для этого используем официальную пожарную статистику [1, 2].

В 2020 г. в России произошли 439 100 пожаров, из них 205 425 пожаров в СМ (т.е. 46,8 % всех пожаров). При них погибло 8262 чел., из которых 355 чел. — дети (4,3 %). На СМ приходится 4038 чел. (48,9 % всех жертв), причем 194 чел. — дети (4,8 %). Уже отсюда следует, что на четверть населения России, живущего в СМ, приходится почти половина всех пожаров, половина их жертв, причем больше половины всех погибших при пожарах в России детей живут в СМ.

Основными объектами пожаров в сельской местности, по совокупности которых происходит 99 % всех пожаров, являются: сухая трава (42 %), здания жилого назначения (35 %), мусор (22 %).

Основными причинами пожаров в сельской местности, которые обуславливают 89 % всех пожаров, являются неосторожное обращение с огнем (69 %), неправильное устройство и эксплуатация электрооборудования (12 %) и печного оборудования (8 %).

Эти данные говорят о том, что пожарная опасность СМ чрезвычайно высока и ее нужно исследовать более детально, чтобы затем разработать план обеспечения ее пожарной безопасности.

Для решения этой задачи используем интегральные пожарные риски [3].

Пожарных рисков очень много (десятки). Нам потребуется четыре основных:

$$R_1 \left[\frac{\text{пожар}}{\text{чел. ед. вр.}} \right], R_2 \left[\frac{\text{жертва}}{\text{пожар}} \right],$$

$$R_3 \left[\frac{\text{жертва}}{\text{чел. ед. вр.}} \right], R_4 \left[\frac{\text{ущерб}}{\text{чел. ед. вр.}} \right],$$

где R_1 — риск для человека оказаться в условиях пожара в единицу времени (год);

R_2 — риск для человека погибнуть при пожаре;

R_3 — риск для человека погибнуть от пожара в единицу времени;

R_4 — риск материального ущерба от пожара для человека в единицу времени.

Следовательно, риск R_1 характеризует опасность пожара, риски R_2 и R_3 — социальные последствия пожара, а R_4 — экономические последствия.

Все эти интегральные риски можно вычислять для страны в целом, для ее городов, для ее СМ, для отдельных регионов и др. Можно изучить динамику всех рисков и многое другое. При этом будем иметь в виду, что $R_3 = R_1 R_2$.

Сначала оценим обстановку с пожарами в России в 2020 г., используя указанные пожарные риски. Исходные данные приведены в табл. 1, а в табл. 2 — значения пожарных рисков для этих объектов и их соотношения.

Из данных табл. 2 следует, что в 2020 г. в России на каждые 1000 чел. в год приходится 3 пожара, на каждые 100 пожаров — 1,9 жертвы, на каждые 100 000 чел. — 5,7 погибших при пожаре. За год ущерб от пожаров на одного человека составляет 133 тыс. руб.

В сельской местности значения всех рисков больше среднероссийских и городских рисков.

Для сравнения, следует отметить, что и в других странах обстановка с пожарами в сельской местности тоже значительно хуже, чем в городах.

Например, в США, где численность сельского населения в последние годы (2015–2016 гг.) составляет 15...16 % от общей численности, значение риска R_1 на национальном уровне — 4,5 пожаров на 1000 чел. в год (в городах — 3,1, в сельской местности — 10,8), т.е. риск пожаров в сельской местности в 2,4 раза выше, чем в городах. Значение риска R_3 на национальном уровне составляет 1,1 погибших на 100 тыс. чел. в год (в городах — 0,6, в сель-

¹ Федеральная служба государственной статистики. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/12781>

Таблица 1. Обстановка с пожарами в России в 2020 г.**Table 1.** Fire situation in Russia in 2020

Объект исследования Scope of research	Население, тыс. чел. Population, thousand residents	Число пожаров, ед. Number of fires, fires	Число жертв, чел. Number of casualties, persons	Прямой ущерб, тыс. руб. Direct damage, thousand RR
Россия Russia	146 748	439 100	8 262	19 419 914
Города и поселки городского типа Township and urban-type settlements	108 562	233 675	4 224	13 107 364
Сельская местность Rural area	37 186	205 425	4 038	6 312 550

Таблица 2. Интегральные пожарные риски в России в 2020 г.**Table 2.** Integral fire risks in Russia in 2020

Объект исследования Scope of research	$R_1 \cdot 10^3$	$R_2 \cdot 10^2$	$R_3 \cdot 10^5$	R_4 , тыс. руб. R_4 , thousand RR
Россия, R_i Russia, R_i	3,0	1,9	5,6	133
Города и поселки городского типа, R_i Township and urban-type settlements, R_i	2,1	1,8	3,9	120
Сельская местность, R_i Rural area, R_i	5,5	2,0	10,8	170
Отношения рисков Ratio of risks				
Значения Values	R_1^c / R_1^r R_1^r / R_1^u	R_2^c / R_2^r R_2^r / R_2^u	R_3^c / R_3^r R_3^r / R_3^u	R_4^c / R_4^r R_4^r / R_4^u
	2,6	1,1	2,8	1,4

ской местности — 2,1), т.е. риск гибели людей при пожарах в сельской местности в 3,5 раза выше, чем в городах (табл. 3)² [4].

Далее представляется целесообразным рассчитать ориентировочный комплексный показатель пожарной опасности сельской местности [5]. Учитывая, что отношения одинаковых рисков являются безразмерными величинами, такой комплексный показатель пожарной опасности сельской местности $K_{по}^c$ можно представить в виде произведения

$$K_{по}^c = \prod_{i=1}^4 \frac{R_i^c}{R_i^r} = \frac{R_1^c}{R_1^r} \cdot \frac{R_2^c}{R_2^r} \cdot \frac{R_3^c}{R_3^r} \cdot \frac{R_4^c}{R_4^r} = \left(\frac{R_3^c}{R_3^r} \right)^2 \frac{R_4^c}{R_4^r}, \quad (1)$$

здесь мы учли, что $R_3 = R_1 R_2$.

В нашем случае для значений рисков 2020 г. будем иметь:

$$K_{по}^c = 2,82^2 \cdot 1,4 = 7,95 \cdot 1,4 = 11,1.$$

Этот результат (с достаточной долей условности) можно интерпретировать так: обстановка с пожарами в сельской местности в России в 2020 г. была в 11 раз хуже, чем в городах.

Этот метод можно применять на национальном, региональном и муниципальных уровнях (и в любой стране).

Итак, мы оценили уровень пожарной опасности сельской местности в России в 2020 г. Но ведь это — случайный процесс, и ситуация может меняться от года к году. Поэтому полезно проверить динамику комплексного показателя $K_{по}^c$ за последние 6 лет. Используем для этого данные пожарной статистики [1, 2].

В табл. 4 представлена динамика интегральных пожарных рисков в России за 2015–2020 гг.

² The Rural Fire Problem. NFPA Journal. URL: <https://www.nfpa.org/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2017/July-August-2017/Features/Rural>

Таблица 3. Интегральные пожарные риски в США в 2016 г.

Table 3. Integral fire risks in the USA in 2016.

Объект исследования Scope of research	$R_1 \cdot 10^3$	$R_2 \cdot 10^2$	$R_3 \cdot 10^5$
США, R_i USA, R_i	4,5	0,2	1,1
Населенные пункты с численностью населения 1 млн чел. и более, R_i Populated localities, having the population numbers equal to and exceeding 1 million residents, R_i	3,1	0,1	0,6
Населенные пункты с численностью населения 2500 чел. и менее, R_i Populated localities, having the population numbers equal to and below 2,500 residents, R_i	10,8	0,2	2,1
Отношения рисков Ratio of risks			
Значения Values	R_1^c / R_1^r R_1^r / R_1^u	R_2^c / R_2^r R_2^r / R_2^u	R_3^c / R_3^r R_3^r / R_3^u
	2,4	2,0	3,5

Заметим, что опять значения всех пожарных рисков для каждого года в сельской местности больше значений пожарных рисков для городов.

Теперь составим отношения всех этих рисков и определим значения комплексного показателя для каждого года $K_{по}^c$ (табл. 5 и рис.1).

Из табл. 4 и рис. 1 мы видим, что в период 2015–2020 гг. ежегодный уровень пожарной опасности сельской местности России всегда был в 10–20 раз выше, чем в городах, и в последние два года наблюдалось его снижение.

Это означает, что для сельской местности России нужно разрабатывать специальный план обеспечения ее пожарной безопасности. Но при этом нужно учитывать следующее.

Россия — страна огромная. Доля сельского населения в ее федеральных округах колеблется от 16,1 % (Северо-Западный округ) до 50,9 % (Северо-Кавказский), а в целом по России она составляет 25,5 %.

Поэтому подробное детальное исследование нужно проводить для каждого округа, а также для каждого субъекта Российской Федерации. Но такое исследование потребует не статьи, а целой книги.

В качестве примера дадим сравнительный анализ обстановки с пожарами в сельской местности России (на уровне федеральных округов) в 2020 г.¹ (табл. 6) [1, 2].

Из табл. 6 видно, что самая меньшая доля сельского населения (менее 20 %) находится в Северо-Западном, Центральном и Уральском округах. Но на него приходится 35–55 % всех пожаров и 42–51 % всех жертв. Поэтому $K_{по}^c$ показывает, что в сельской местности этих округов обстановка с пожарами в 26–75 раз хуже, чем в городах, где есть мощная профессиональная пожарная охрана.

Таблица 4. Динамика пожарных рисков в 2015–2019 гг.

Table 4. Dynamics of fire risks in 2015–2019

Значения рисков Risk values	Год Year					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
R_1^r / R_1^u	0,80	0,80	0,70	0,70	2,40	2,1
R_1^c / R_1^r	1,60	1,50	1,40	1,50	5,50	5,5
R_2^r / R_2^u	5,30	5,20	4,80	5,00	1,60	1,8
R_2^c / R_2^r	8,20	7,80	7,40	7,40	2,10	2,0
R_3^r / R_3^u	4,20	4,00	3,50	3,50	3,90	3,9
R_3^c / R_3^r	12,80	11,70	10,70	10,80	11,40	10,8
R_4^r / R_4^u	129,30	64,60	81,90	87,20	111,80	129
R_4^c / R_4^r	224,70	171,20	130,00	161,60	160,80	169

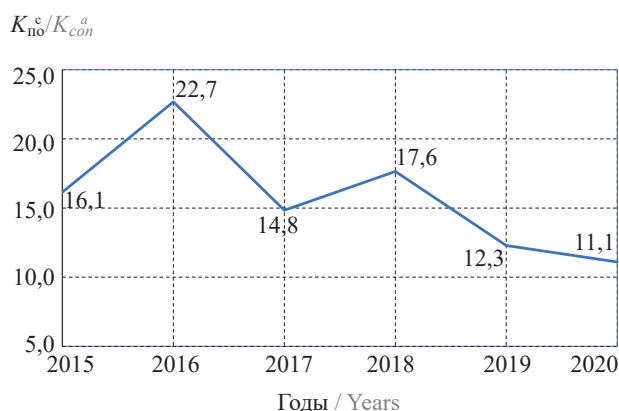


Рис. 1. Динамика комплексного показателя пожарной опасности K_{po}^c СМ

Fig. 1. The dynamics of the composite indicator of the fire hazard K_{con}^a SM

С другой стороны, в Северо-Кавказском округе сельское население составляет половину всего населения, и обстановка с пожарами в сельской местности только в 5 раз хуже, чем в городах. Остальные округа сравнительно похожи по всем показателям.

Этот пример показывает, что разрабатывать меры обеспечения пожарной безопасности в сельской местности нужно отдельно для каждого округа и субъекта Российской Федерации.

Мы остановимся на этом примере и наметим подходы к организации противопожарной защиты сельской местности России для страны в целом. Для этого используем данные по численности населения 2019 г. (очередная перепись населения должна пройти в конце 2021 г.).

В 2019 г. в России насчитывалось 146,8 млн чел., из которых только 22 % проживали в сельской местности.

В 2019 г. в России было зарегистрировано 471 тыс. пожаров и 8,5 тыс. чел. погибших, из которых в сельской местности 205 тыс. (43,6 % всех

пожаров) и 4,24 тыс. погибших (50 % всех погибших).

Отсюда следует, что на каждую тысячу жителей России в 2019 г. приходилось в среднем 3,2 пожара (2,4 пожаров на тысячу жителей в городах и 5,4 — в сельской местности) и на каждые 100 тыс. чел. приходилось 5,8 погибших (3,8 погибших на 100 тыс. в городах и 13,0 — в сельской местности).

Зная распределение численности населения по населенным пунктам различной категории, можно ориентировочно вычислить число вызовов, пожаров, происходящих за год в каждом таком поселении, а также число погибших при пожарах людей. Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Из табл. 7 видно, что в 36 017 малых сельских населенных пунктах с населением до 10 чел. пожаров очень мало, в среднем 2–3 пожара за 100 лет на 1 такое поселение. В этой же группе от 11 до 100 чел. (47 163 поселений) за 100 лет на 1 поселение приходится 20 пожаров. В населенных пунктах (с населением от 101 до 1000 чел.) (43 280 поселений) ежегодно происходят 1–2 пожара. Всего в этой категории проживает 11 % всего населения, происходит примерно 19 % всех пожаров в год и погибает 24 % всех погибших.

Борьба с пожарами в малых сельских поселениях — дело, в основном, добровольной пожарной охраны. Профессиональная противопожарная служба не в состоянии заниматься всеми такими пожарами. На рис. 2 представлено распределение пожарно-спасательных подразделений, дислоцирующихся в населенных пунктах России с численностью населения менее 1000 чел. в 2019 г.

А вот как выглядит распределение пожарных подразделений по небольшим сельским населенным пунктам (с численностью населения до 2500 чел.) в США: 92,7 % всех пожарных департаментов, за-

Таблица 5. Отношения пожарных рисков в 2015–2019 гг.

Table 5. Ratios of fire risks in 2015–2019

Отношения рисков Ratio of risks	Год Year					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
R_1^c / R_1^r R_1^r / R_1^u	2,00	1,88	2,00	2,14	2,29	2,59
R_2^c / R_2^r R_2^r / R_2^u	1,55	1,50	1,54	1,48	1,31	1,10
R_3^c / R_3^r R_3^r / R_3^u	3,05	2,93	3,06	3,09	2,92	2,82
R_4^c / R_4^r R_4^r / R_4^u	1,74	2,65	1,59	1,85	1,44	1,42
K_{po}^c Composite indicator K_{con}^a	16,14	22,67	14,84	17,65	12,29	11,10

Таблица 6. Обстановка с пожарами в сельской местности округов России в 2020 г.

Table 6. The fire situation in the rural areas of the Russian federal districts in 2020

Федеральный округ Federal district	Доля сельской местности, % The share of rural areas, %				$\frac{K_{\text{по}}}{K_{\text{ср}}}$
	Население Population	Число пожаров Number of fires	Число жертв Number of casualties	Прямой ущерб Direct damage	
Центральный Central	17,7	55,6	51,5	18,7	26,2
Северо-Западный North-western	15,1	35,7	44,6	37,4	69,6
Южный Southern	37,2	52,8	51,7	55,6	6,9
Северо-Кавказский North Caucasian	49,7	58,2	65,2	59,8	5,4
Приволжский Privolzhsky	27,8	48,7	53,3	42,5	16,8
Уральский Uralian	18,4	36,4	41,9	62,1	74,6
Сибирский Siberian	25,7	43,8	45,8	41,4	12,2
Дальневосточный Far-Eastern	27,1	32,6	40,2	39,2	5,7
РФ Russian Federation	25,3	46,8	48,9	32,5	11,1

Таблица 7. Распределение численности населения, числа выездов, пожаров и погибших людей по сельским населенным пунктам России в 2019 г.

Table 7. The breakdown of population numbers, the number of responses, fires and casualties in the Russian rural settlements in 2019

Категория Category	Население, чел. Population, residents	Число населенных пунктов Number of settlements	Среднее число на один населенный пункт The average number per settlement:			
			жителей, чел. residents, persons	выездов в год responses per year	пожаров в год fires per year	погибших в год casualties per year
Малые Small	0	19 439	0	0,00	0,00	0,0000
	1–10	36 017	5	0,06	0,03	0,0006
	11–100	47 163	35	0,40	0,20	0,0045
	101–1000	43 280	315	16,50	1,70	0,1755
Средние Medium	1001–5000	6 941	1 350	16,50	7,30	0,1755
Крупные Large	Более 5,000 Over 5,000	784	7 235	88,80	39,0	0,9405
Всего Total	32 596 513	153 624	212	2,60	1,30	0,0275

щищающих данную категорию населенных пунктов, являются полностью добровольными [6].

В каждом из 6941 средних сельских населенных пунктах России происходит 7–8 пожаров в год и раз в 6–7 лет погибает человек. Всего в этой категории проживает 7 %, происходит примерно 12 % всех пожаров в год и погибает 15 % всех погибших.

Защищать от пожаров данную категорию населенных пунктов должны добровольцы и профессионалы МПО, ППС.

В оставшихся 784 крупных сельских населенных пунктах ежегодно в каждом из таких поселений возникает в среднем 40 пожаров, при которых погибает 1 чел. Всего в этой категории проживает

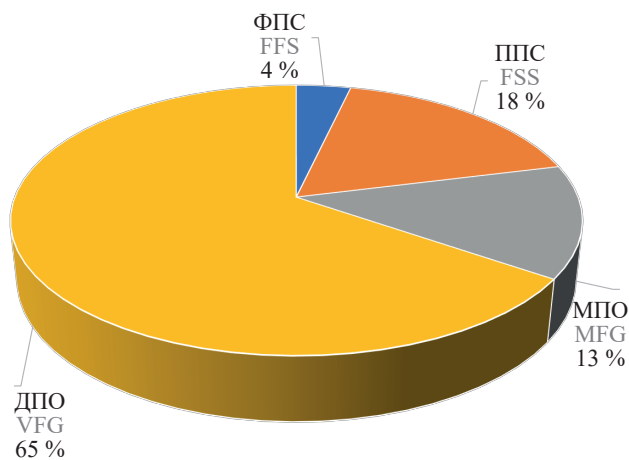


Рис. 2. Распределение пожарно-спасательных подразделений, дислоцирующихся в населенных пунктах с численностью населения менее 1000 чел.: ДПО — добровольная пожарная охрана; МПО — муниципальная пожарная охрана; ППС — противопожарная служба субъекта, ФПС — федеральная противопожарная служба

Fig. 2. The breakdown of fire and rescue teams, located in settlements whose population numbers are below 1,000 residents: VFG — voluntary fire guards; MFG — municipal fire guards; FSS — fire service of a subject; FFS — federal fire service

4 %, происходит примерно 8 % всех пожаров в год и погибает 10 % всех погибших.

Борьба с пожарами в крупных сельских поселениях — дело добровольной и профессиональной (МПО, ППС, ФПС) пожарной охраны.

Такова детализированная обстановка с пожарами в сельских населенных пунктах России в 2019 г.

На основании этого анализа можно предложить следующие подходы к организации противопожарной службы в сельской местности России.

Защиту от пожаров в малых сельских населенных пунктах с численностью населения до 1000 чел. (таких поселений 126 460) целесообразно организовывать следующим образом. Если населенные пункты не входят в зоны покрытия существующих пожарных подразделений, то необходимо создавать для 10–15 (или 15–20) таких населенных пунктов «оперативные зоны», если это возможно по географическим условиям (для создания оперативных зон необходимы сравнительно небольшие расстояния между населенными пунктами, и в ряде регионов такие условия могут не выполняться). Обслуживать эти «оперативные зоны» должны подразделения ДПК или частично МПО [9].

В сельских населенных пунктах с численностью населения от 1000 до 5000 чел. создаются подразделения ДПО, МПО или ППС.

В сельских населенных пунктах с численностью населения свыше 5000 чел. создаются подразделения ДПО, МПО, ППС или ФПС (табл. 8).

Далее в табл. 9 представлены результаты ориентировочного расчета численности пожарных подразделений для защиты сельских населенных пунктов России.

Таблица 8. Организации противопожарной службы в сельских населенных пунктах России

Table 8. Firefighting organizations in the rural settlements of Russia

Категория населенных пунктов Category of settlements	Численность населения, чел. Population, residents	Число населенных пунктов Number of settlements	Вид службы Type of service	Число подразделений противопожарной службы Number of teams of the firefighting service
Малые Small	10 и менее 10 and fewer	36 017	ДПО, МПО VFG, MFG	Если населенные пункты не входят в зону покрытия существующих подразделений, необходимо создание оперативных зон, обслуживаемых одним подразделением (один пожарный автомобиль) If settlements are outside of the area of coverage of the fire teams in operation, fast-response areas must be established and serviced by one team (one fire-fighting vehicle)
	11–100	47 163		
	101–1000	43 280		
Средние и большие Medium and large	1001–5000	6941	ДПО, МПО, ППС VFG, MFG, FSS	Одно подразделение (один пожарный автомобиль) One team (one firefighting vehicle)
Крупные Extra-large	Более 5000 Over 5,000	784	ДПО, МПО, ППС, ФПС VFG, MFG, FSS, FFS	Одно подразделение (два пожарных автомобиля) One team (two firefighting vehicles)

Таблица 9. Ориентировочная численность противопожарной службы в сельских населенных пунктах (при полных боевых расчетах)

Table 9. The approximate number of the firefighting service officers in rural settlements (if the entire team is available)

Число жителей, чел. Number of residents, persons	Число поселений Number of settlements	Численность основной и специальной пожарной техники и личного состава боевых расчетов (на число поселений) Number of basic and specialized items of firefighting machines and members of firefighting teams				Личный состав всего Total number of firefighters
		АЦ Firefighting vehicle	чел. persons	АЛ Fire motor ladder	чел. persons	
Не более 1000 1,000 and fewer	126 460	1 (10)	8-10* (10)	—	—	126 460
1001–5000	6941	1 (1)	8-10* (1)	—	—	69 410
Не менее 5001 At least, 5,001	784	2 (1)	54 (1)	1 (1)**	8 (1)**	77 128
ИТОГО TOTAL	134 185	21 155	238 206	1244**	7464**	Примерно 273 000 Approximately 273,000

* Поскольку речь идет в основном о ДПК, на 1 АЦ принимается 8–10 чел., а на АЛ — 4–6 чел.

** При наличии зданий высотой четыре этажа и более.

* Since the subject in question is a voluntary firefighting team, one firefighting vehicle takes 8–10 team members, and one fire motor ladder takes 4–6 team members.

** In case of four-floor and higher buildings.

Выводы

В заключение мы хотим сделать следующее замечание. Наши расчеты носят усредненный характер для всей России. В действительности, обстановка с пожарами во всех 85 субъектах Российской Федерации достаточно сильно отличается от субъекта к субъекту своими параметрами [3]. Поэтому, используя изложенную методологию [8, 9], нужно прове-

сти аналогичные расчеты для каждого субъекта РФ. В результате мы получим существенно более точные данные для всех перечисленных таблиц, что позволит скорректировать общую численность пожарной техники, пожарных депо и личного состава ППС страны, скорее всего, в меньшую сторону. Но это необходимо проверить. «Не будем спорить, будем вычислять», как говорил великий Г.В. Лейбниц (1646–1716).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2019 году. Статистический сборник. Статистика пожаров и их последствий. М. : ВНИИПО, 2020. 80 с.
2. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник. Статистика пожаров и их последствий. М. : ВНИИПО, 2021. 60 с.
3. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Кленко Е.А. и др. Основы теории пожарных рисков и ее приложения. Монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2012. 192 с.
4. Ahrens M., Evarts B. Fire losses in the United States During 2019. NFPA, September 2020.
5. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Кленко Е.А., Попков С.Ю., Иванова О.В. Комплексный показатель пожарной безопасности в сельской местности. Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация. М. : Академия ГПС МЧС России, 2016. С. 48–52.
6. Evarts B., Gary P. Stein. US Fire Departments Profile – 2018. NFPA, February 2020.
7. Попков С.Ю. Оценка пожарной опасности муниципальных образований на основе комплексного показателя : дис. ... канд. техн. наук. М., 2012. 250 с.
8. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Вагнер П. и др. Безопасность городов: имитационное моделирование городских процессов и систем. М. : ФАЗИС, 2004. 172 с.

9. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Основы теории организации, функционирования и управления экстренными и аварийно-спасательными службами : монография. М. : Академия ГПС МЧС России, 2018. С. 92.

REFERENCES

1. *Fires and fire safety in 2019. Statistical yearbook.* Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2020; 80. (rus).
2. *Fires and fire safety in 2020. Statistical yearbook.* Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection Publ., 2021; 60. (rus).
3. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Klepko E.A., Belov V.A., Ivanova O.V., Popkov S.Yu. *Basic theory of fire risks and its applications.* Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2012; 192. (rus).
4. Ahrens M., Evarts B. *Fire losses in the United States During 2019. NFPA, September 2020.*
5. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., M., Klepko E.A., Popkov S.Ju., Ivanova O.V. *Comprehensive indicator of fire safety in rural areas. Fires and Emergencies: Prevention and Response.* Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2016; 48-52. (rus).
6. Evarts B., Gary P. Stein. *US Fire Departments Profile – 2018. NFPA, February 2020.*
7. Popkov S.Yu. *Assessment of the fire hazard of municipalities on the basis of a complex indicator : dissertation... candidate of technical sciences.* Moscow, 2012; 250. (rus).
8. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V., Vagner P. *City Safety: Simulation of Urban Processes and Systems.* Moscow, FAZIS Publ., 2004; 172. (rus).
9. Brushlinskiy N.N., Sokolov S.V. *Fundamentals of the theory of organization, functioning and management of emergency and rescue services : Monograph.* Moscow, State Fire Academy of Emercom of Russia Publ., 2018; 92. (rus).

Поступила 30.09.2021, после доработки 18.10.2021;
принята к публикации 29.10.2021

Received September 30, 2021; Received in revised form October 18, 2021;
Accepted October 29, 2021

Информация об авторах

БРУШЛИНСКИЙ Николай Николаевич, д-р техн. наук, профессор, академик РАЕН, заслуженный деятель науки РФ, профессор Учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 141792; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

СОКОЛОВ Сергей Викторович, д-р техн. наук, профессор, профессор Учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 692884; ORCID: 0000-0002-2992-8510; e-mail: albrus-ssv@yandex.ru

ГРИГОРЬЕВА Маргарита Петровна, канд. техн. наук, старший преподаватель Учебно-научного комплекса систем обеспечения пожарной безопасности, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Россий-

Information about the authors

Nikolay N. BRUSLINSKIY, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Academician of Russian Academy of Natural Sciences, Honoured Scientist of the Russian Federation, Professor of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 141792; ORCID: 0000-0003-0973-7095; e-mail: nbrus1934@yandex.ru

Sergey V. SOKOLOV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 692884; ORCID: 0000-0002-2992-8510, e-mail: albrus-ssv@yandex

Margarita P. GRIGORIEVA, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of Scientific and Educational Department, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural

ской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 772050; ORCID: 0000-0003-3634-7842; e-mail: margarita_theone@mail.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 772050; ORCID: 0000-0003-3634-7842; e-mail: margarita_theone@mail.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 97–107

POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):97-107

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ СТАТЬЯ / SCIENTIFIC AND THEORETICAL PAPER

УДК 630.431, 614.85, 614.882, 614.846.6.97–107

<https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.06.97-107>

Об обеспечении безопасного следования автомобиля экстренной службы в сложных дорожных условиях

Игорь Геннадьевич Малыгин^{1,2}, Александр Алексеевич Таранцев^{1,2}✉¹ Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, г. Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Обоснована актуальность исследования, вызванная необходимостью безопасного и своевременного прибытия автомобиля экстренной службы (пожарные, полиция, медики, газовая служба) к месту вызова в условиях плохой видимости на дороге — задымления, тумана, снегопада, в ночное время при отсутствии освещенности.

Обеспечение безопасного движения в условиях плохой видимости. При задымлении дорожной сети и снижении видимости из-за ландшафтных пожаров безопасное следование обеспечивается созданием избыточного давления воздуха в салоне и применением тепловизора водителем. При следовании автомобиля в условиях тумана, снегопада или отсутствия освещенности также может применяться тепловизор. Приведен газодинамический расчет для подпора воздуха в салоне и соответствующие схемы. Сделана газодинамическая оценка расхода подаваемого воздуха при неполной герметичности кабины с учетом находящегося в ней экипажа.

Движение автомобиля при подтоплении и повреждении дороги. Приведена конструктивно-компоновочная схема автомобиля экстренной службы, предназначенного для движения по подтопленной местности и при поврежденном дорожном полотне.

Выводы. Новизна и целесообразность вышеописанных технических решений подкреплена патентами РФ. Внедрение их позволит экстренным службам безопасно прибывать к месту вызова вне зависимости от сложности дорожных условий.

Ключевые слова: задымление; плохая видимость; тепловизор; подпор воздуха; подтопление дороги; своевременность прибытия автомобиля

Для цитирования: Малыгин И.Г., Таранцев А.А. Об обеспечении безопасного следования автомобиля экстренной службы в сложных дорожных условиях // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 97–107. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.97-107

✉ Таранцев Александр Алексеевич, e-mail: t__54@mail.ru

On ensuring the safe movement of emergency service vehicles under hazardous driving conditions

Igor G. Malygin^{1,2}, Alexander A. Tarantsev^{1,2}✉¹ Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russian Federation² Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The relevance of the study is substantiated by the need for a safe and timely arrival of an emergency service vehicle (firefighters, police, paramedics, gas service teams) to the place of call under the conditions of poor road visibility due to smoke, fog, snowfalls, the night time in the absence of illumination.

Ensuring safe movement under the conditions of poor visibility. In case of smoke and insufficient visibility due to wildfires, safe movement is possible, if the air pressure in the cabin is excessive and the driver uses a thermal imager by. When a car is driven under the conditions of fog, a snowfall or the lack of illumination, a thermal imager can also be used. The gas-dynamic analysis of air supply to the cabin and its schemes are provided. The co-authors made a gas-dynamic assessment of the air flow rate if the cabin is not hermetically sealed and the crew stay inside.

The car movement in case of floods and damaged roads. The structural layout diagram of an emergency service vehicle designed to move through flooded areas and along damaged roadbeds is provided.

Conclusions. The novelty and expediency of the above technical solutions are confirmed by the RF patents. Their implementation will allow emergency services to arrive safely to the place of call, regardless of the road conditions.

Keywords: smoke; poor visibility; thermal imager; air pumping; road flood; timeliness of the vehicle arrival

For citation: Malygin I.G., Tarantsev A.A. On ensuring the safe movement of emergency service vehicles under hazardous driving conditions. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):97-107. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.97-107 (rus).

✉ Alexander Alexeevich Tarantsev, e-mail: t__54@mail.ru

Введение

Быстрое и безопасное прибытие автомобиля экстренной службы (пожарного, полицейского, скорой медицинской помощи, газовой службы)¹ к месту вызова является важным условием успешного решения задачи — тушения пожара^{2, 3, 4} [1–6], задержания нарушителей правопорядка^{5, 6, 7} (требования к отечественным оперативно-служебным автомобилям изложены в ГОСТ 34600–2019⁸), оказания помощи пострадавшим^{9, 10, 11} (требования к отечественным автомобилям скорой медицинской помощи изложены в ГОСТ 33655–2015¹²), устранения аварийной утечки газа^{13, 14} [6] и т.п.

В то же время, многочисленные ландшафтные пожары, случающиеся практически каждое лето,

приводят к задымленности больших территорий, в том числе дорожной сети (рис. 1, а). Надо отметить, что проблеме лесных пожаров посвящено достаточно много научных работ, например, [7–18], обзорных статей¹⁵, а также диссертаций [19–22].

Движение автомобилей в условиях задымления [23] приводит к риску ДТП. Дополнительную угрозу представляют подземные (торфяные) пожары [2], в результате которых возникают прогары под дорожной сетью, что сопровождается риском провалов в них автомобилей. Это приводит к необходимости блокировать автомобильное движение в таких районах и рекомендовать водителям двигаться по объездным маршрутам.

Весьма непростая ситуация возникает для вышеуказанных экстренных служб, подразделения которых получают приказ (распоряжение) на выезд, но дорога к месту вызова заблокирована дымом (см. рис. 1, а) или видимость снижена туманом (рис. 1, б), снегопадом (рис. 1, в), или отсутствует освещение в темное время суток (рис. 1, д). Движение в таких условиях чревато риском ДТП, опасностью для экипажей и техники этих подразделений и даже срывом выполнения задачи. При этом следует иметь в виду, что мобильные подразделения экстренных служб имеют жесткие временные нормативы прибытия к месту вызова (например, определенные в Федеральном законе ФЗ-123¹⁶) (рис. 2).

Такая ситуация приводит к необходимости изыскания возможностей обеспечения прибытия оперативных подразделений экстренных служб к месту вызова по задымленной местности и в условиях плохой видимости при условии обеспечения безопасности их экипажей, что и является **целью статьи**. **Задача статьи** — рассмотрение и обоснование инновационных схем автомобилей экстренных служб, способных безопасно следовать к месту вызова в сложных дорожных условиях, в том числе из-за задымления при ландшафтных пожарах.

Обеспечение безопасного движения в условиях плохой видимости

Для достижения вышеуказанной цели и решения поставленной задачи специалистами ИПТ РАН была предложена усовершенствованная конструк-

¹ Об утверждении требований к транспортным средствам оперативных служб, используемым для осуществления неотложных действий по защите жизни и здоровья граждан : Постановление Правительства Российской Федерации № 548 от 30 августа 2007 г.

² Боевой устав подразделений пожарной охраны, определяющий порядок организации тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ : утвержден приказом МЧС от 16 октября 2017 г. № 444 ; зарегистрирован в Минюсте РФ 20 февраля 2018 г., рег. № 50100.

³ Пожарная техника. URL: <https://www.mchs.gov.ru/ministerstvo/o-ministerstve/tehnika/pozharnaya-tehnika>

⁴ Зарубежные пожарные автомобили. Виды пожарных автомобилей. URL: https://справка01.pf/articles/technics/zarubezhnye_pozharnye_avtomobili

⁵ О полиции : Федеральный закон от 7 февраля 2011 г. № 3-ФЗ.

⁶ Полицейские машины России. URL: <https://avto-forum.name/threads/policejskie-mashiny-rossii-na-chem-ezdjat-strazhi-porjadka.3738/> (дата обращения: 31.10.2021).

⁷ Полицейские автомобили разных стран. URL: https://zen.yandex.ru/media/auto_scepa/policejskie-avtomobili-raznyh-stran-5b83aead1e0fde00a78c1a72

⁸ ГОСТ 34600-2019. Автомобили оперативно-служебные для патрулирования и выезда на места происшествий нарядов дежурных частей органов охраны правопорядка.

⁹ Правила организации деятельности мобильной медицинской бригады : утверждены приказом Минздрава РФ от 27 марта 2019 г. № 164н.

¹⁰ Модельный ряд Lada. Медслужбы 2020. URL: <https://promtehn.ru/press-tsentr/novosti/modelnyy-ryad-lada-medsluzhby-2020>

¹¹ Автомобили специального медицинского назначения. URL: https://epm-med.ru/work/avto_spec_med_naz/ (дата обращения: 31.10.2021).

¹² ГОСТ 33655-2015. Автомобили скорой медицинской помощи. Технические требования и методы испытаний.

¹³ О газоснабжении в Российской Федерации : Федеральный закон № 69-ФЗ от 31 марта 1999 г. (с изменениями).

¹⁴ Автомобили службы 04 «Горгаз». URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5e4077902514b579c924d2dd/avtomobili-slujby-04-gorgaz-601bc384c5e0377269c24ea9>.

¹⁵ Не только Австралия: 8 великих лесных пожаров XXI века. URL: <https://realty.rbc.ru/news/5e499e729a7947d8fed190b>

¹⁶ Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. (с изменениями).

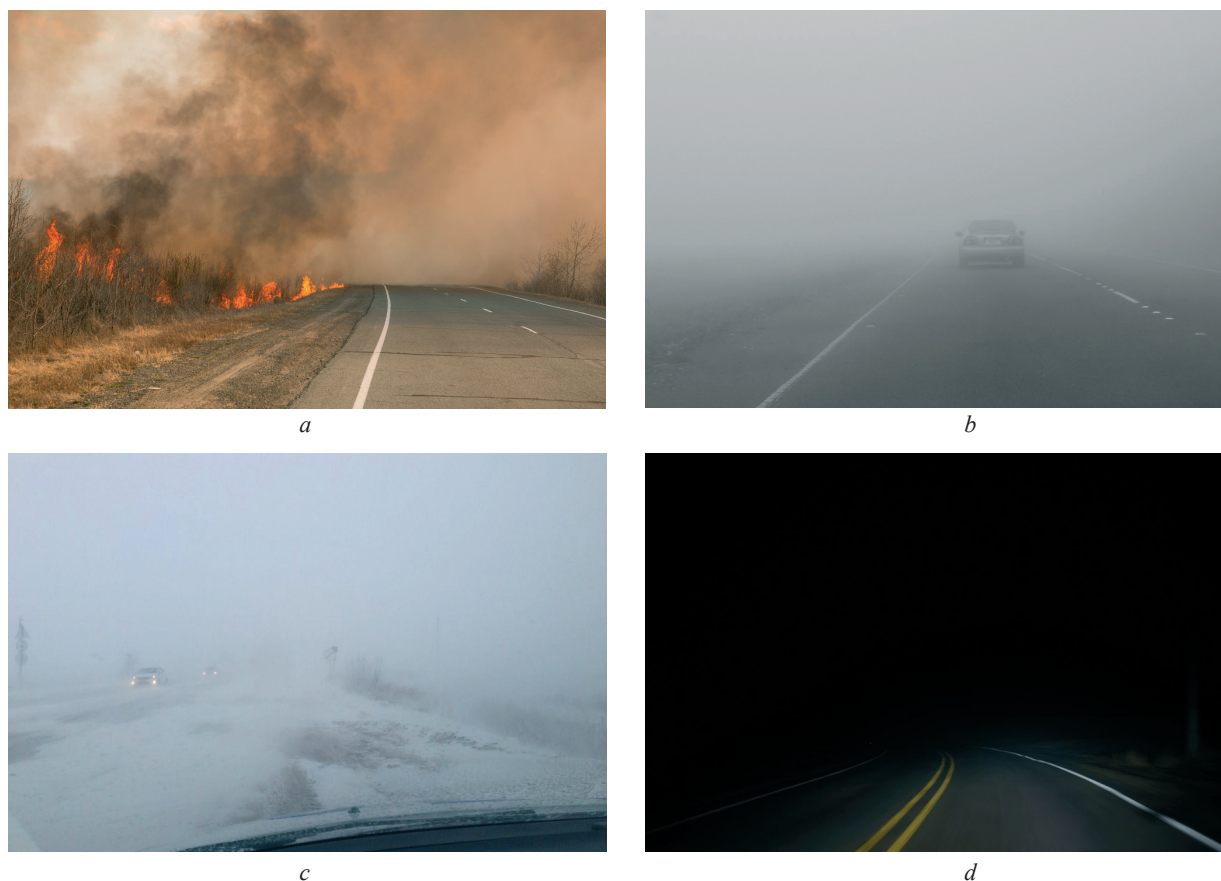


Рис. 1. Снижение видимости на дороге: *a* — задымление при лесном пожаре; *b* — туман; *c* — снегопад; *d* — темное время суток
Fig. 1. Cases of reduced road visibility: *a* — smoke caused by wildfires; *b* — fog; *c* — snowfall; *d* — nighttime darkness

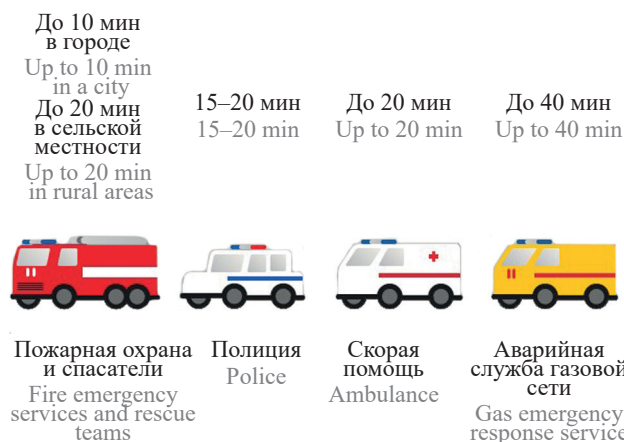


Рис. 2. Нормативы времени прибытия оперативных подразделений экстренных служб

Fig. 2. Standards of the time to arrival for emergency service vehicles

ция автомобиля экстренной службы. Сущность предложения [3] заключается в том, что место водителя в салоне (кабине) автомобиля снабжено тепловизором, а в салоне размещен баллон с воздухом и устройством его регулируемой подачи (рис. 3) для создания подпора воздуха.

В нормальных дорожных условиях такой автомобиль движется, как и все автомобили соответ-

ствующих экстренных служб — водитель находится на сиденье 1 и управляет движением, двигатель 2 обеспечивается воздухом через воздухозаборник 3, который снабжен сеткой для исключения попадания искр в воздушный фильтр двигателя. Маячок 7 включается по необходимости, фары 4 — в ночное время или при тумане.

При необходимости двигаться в условиях задымления при пожаре (см. рис. 1, *a*) возникают риски: отравления водителя и членов экипажа продуктами горения; возникновения ДТП из-за ограниченной видимости; возгорания автомобиля при попадании искр в воздухозаборник 3 (см. рис. 3). Чтобы избежать этих рисков, в салоне автомобиля создается подпор воздуха $\Delta p = p_c - p_a$ (p_c , p_a — давление воздуха в салоне и атмосферное соответственно) подачей его из баллона 8 открытием вентиля 9. При этом экипаж сохраняет работоспособность, дыша чистым воздухом, часть воздуха стравливается через неплотности салона или специальный клапан в атмосферу либо через открытую заслонку 10 подается к двигателю 2 после закрытия клапана воздухозаборника 3.

Водитель на мониторе 5 тепловизора (см. рис. 3) может видеть встречные (рис. 4, *a*) или попутные (рис. 4, *b*) транспортные средства, людей (рис. 4, *c*) и животных, строения (рис. 4, *d*), а также тепловое

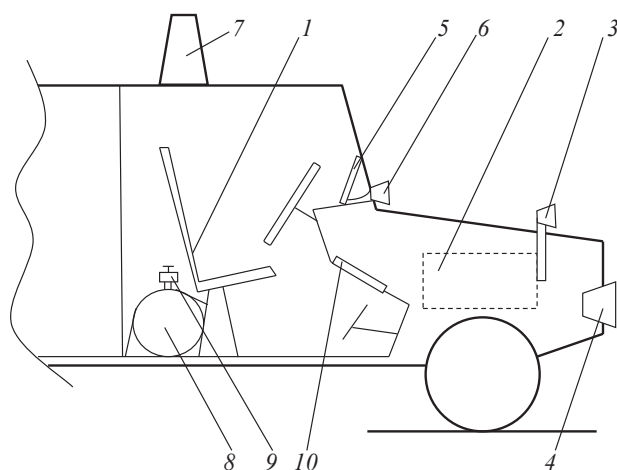


Рис. 3. Вид передней части автомобиля с двигателем [3]: 1 — место водителя; 2 — двигатель; 3 — воздухозаборник с клапаном; 4 — фары; 5 — экран тепловизора; 6, 7 — проблесковый маячок; 8 — баллон с воздухом; 9 — вентиль с редуктором; 10 — заслонка

Fig. 3. The view of the vehicle front and the engine [3]: 1 — the driver's seat; 2 — the engine; 3 — the air intake with a valve; 4 — headlights; 5 — the screen of the thermal imager; 6, 7 — the flashing light; 8 — the air cylinder; 9 — the valve with a reducer; 10 — the damper

поле дороги перед автомобилем, благодаря чему способен избежать попадания в прогары при подземных пожарах [2].

Представляется целесообразным дать некоторые количественные оценки. Согласно [4], истечение воздуха с расходом G из салона под действием избыточного давления Δp (очевидно, воздух таким же расходом G будет подаваться из баллона 8 (см. рис. 3)) будет либо докритическим, либо закритическим.

Взяв за основу расчетную схему на рис. 5, расход G воздуха из салона можно оценить по выражению [4]:

$$G = \mu F p_c \sqrt{\frac{k}{R_b T_c}} f(k, p_a, p_c), \quad (1)$$

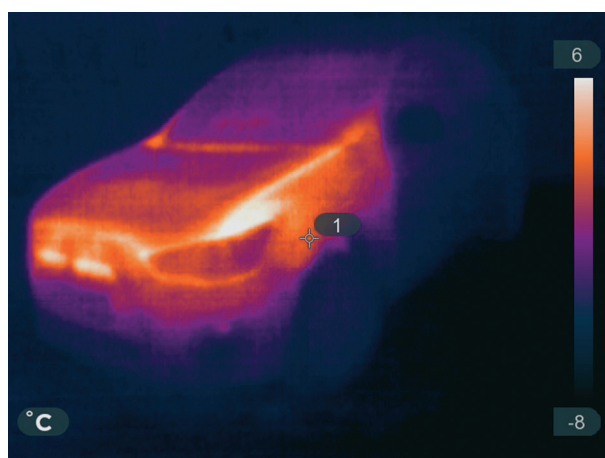
где μ — коэффициент истечения ($\mu \approx 0,7 \dots 0,8$);

F — площадь истечения воздуха из салона, м^2 ;

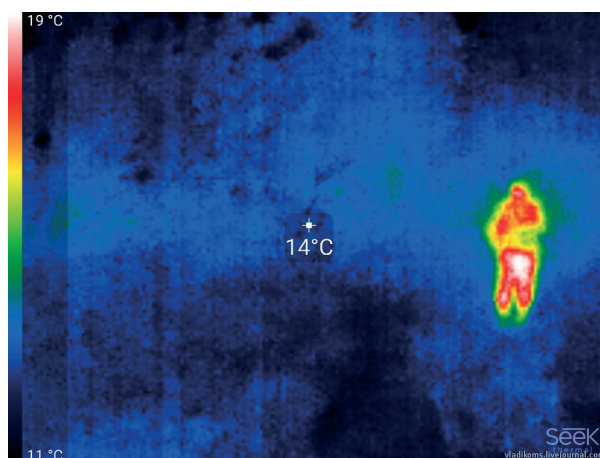
$k \approx 1,4$ — показатель адиабаты воздуха;

$R_b = 287,1 \text{ Дж}(\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$ — газовая постоянная для воздуха;

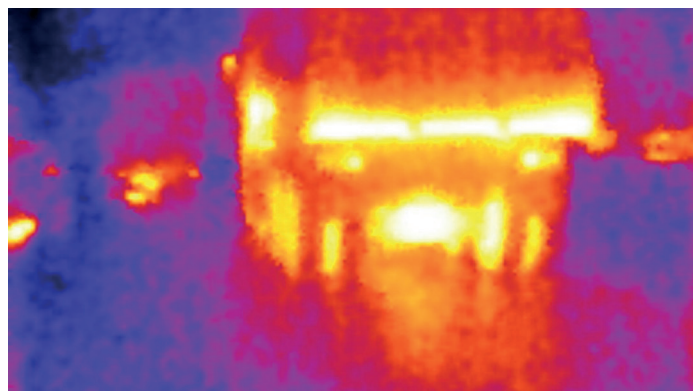
T_c — температура воздуха в салоне, К ;



a



b



c



d

Рис. 4. Применение тепловизора для обеспечения безопасного движения автомобиля в условиях плохой видимости путем получения изображений: *a* — встречного автомобиля; *b* — попутного автомобиля; *c* — пешехода на дороге; *d* — теплотрассы

$f(k, p_a, p_c)$ — функция, зависящая от характера истечения:

$$f(k, p_a, p_c) = \begin{cases} \left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{1/k} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{(k-1)/k}\right]} & \text{при } 1 < \frac{p_c}{p_a} < \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \\ \left(\frac{2}{k+1}\right)^{0,5(k+1)/(k-1)} & \text{при } \frac{p_c}{p_a} \geq \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}. \end{cases} \quad (2)$$

Верхняя часть выражения (2) соответствует докритическому истечению воздуха из салона, нижняя часть — закритическому истечению.

Для наглядности зависимость удельного расхода газа $G(R_s T_c)^{0,5} (\mu F p_c)^{-1}$ от отношения давлений p_c/p_a приведена на рис. 6.

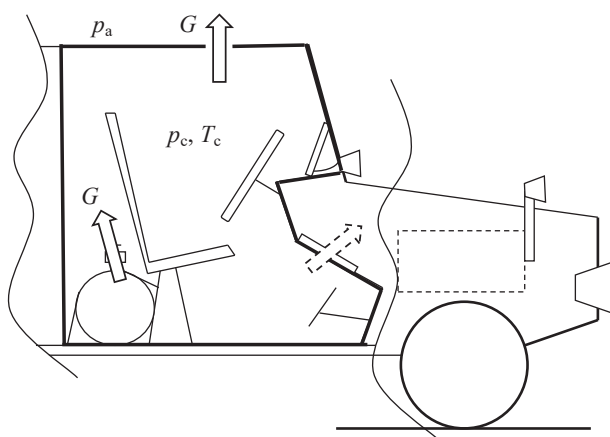


Рис. 5. Расчетная схема газового баланса (пунктирная стрелка — перепуск воздуха к двигателю 2 через заслонку 10 (см. рис. 3))

Fig. 5. The gas balance diagram (the dotted arrow shows the air rerouted towards the engine through damper 10 (see Fig. 3))

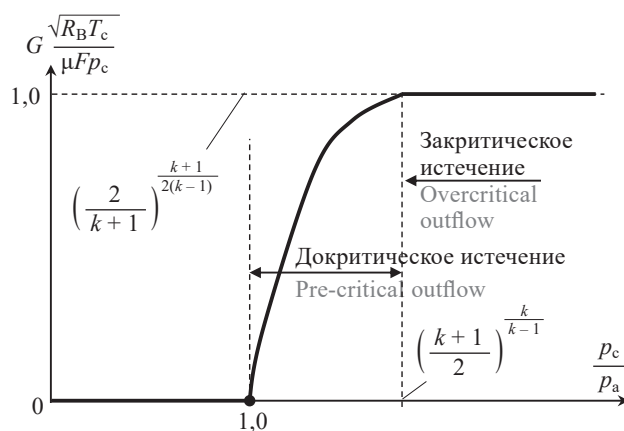


Рис. 6. Зависимость удельного расхода истекающего газа от соотношения давлений p_c/p_a и характера истечения (в случае воздуха, когда $k = 1,4$, для закритического истечения — $G(R_s T_c)^{0,5} (\mu F p_c)^{-1} \approx 0,579$ при $p_c/p_a > 1,893$)

Fig. 6. Dependence between the unit rate of outflowing gas, the correlation of pressures p_c/p_a and the outflow type (in case of air, when $k = 1.4$, for overcritical outflow $G(R_s T_c)^{0,5} (\mu F p_c)^{-1} \approx 0.579$ at $p_c/p_a > 1.893$)

Очевидно, для салона автомобиля будет иметь место докритическое истечение воздуха, когда $p_c/p_a < 1,893$. Зависимость на рис. 6 справедлива и для истечения газа из баллона в салон, только на горизонтальной оси будет отношение давления в баллоне p_6 к давлению воздуха в салоне p_c . Поскольку $p_6/p_c \gg 1$, будет иметь место закритическое истечение воздуха из баллона в салон, но тоже с расходом G , поскольку $\Delta p = \text{const}$. Причем благодаря эффекту дросселирования [4] воздух из баллона будет поступать в салон охлажденным, что обеспечит комфортные условия экипажу при повышенной температуре наружного воздуха из-за ландшафтных пожаров.

С помощью выражений (1) и (2) можно решить следующую задачу. Зная расход воздуха G_3 , необходимый для дыхания экипажа, и избыточное давление Δp в салоне, обеспечивающее непроникновение в него дыма из наружной атмосферы¹⁷, можно найти площадь выпускного отверстия $F_{\text{отв}}$ при условии, что салон достаточно герметичен (автомобиль рассчитан на движение в условиях подтопления местности).

Величина G_3 может быть найдена из выражения:

$$G_3 = n_3 G_1 \quad (3)$$

где n_3 — количество членов экипажа (включая водителя) в салоне;

G_1 — расход воздуха, потребляемого одним человеком ($G_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч} \approx 0,208 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$).

Поскольку, согласно СП 7.13130.2013, $\Delta p < 150 \text{ Па}$ (т.е. $p_c/p_a < 101\,475/101\,325 = 1,0015$, что соответствует докритическому процессу), из (1) и (2) получаем:

$$F_{\text{отв}} = \frac{G_3}{\mu p_c} \sqrt{\frac{R_B T_c}{k}} \left(\frac{p_c}{p_a}\right)^{1/k} \sqrt{2 \left[1 - \left(\frac{p_a}{p_c}\right)^{(k-1)/k}\right]}. \quad (4)$$

¹⁷ СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности (в редакции от 2020 г.).

Полагая, что в салоне шесть членов экипажа, $T_c = 20^\circ\text{C}$ и $\Delta p = 150\text{ Па}$, из (4) получаем:

$$F_{\text{отв}} = \frac{1,25 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 101\,475} \sqrt{\frac{287,1 \cdot 293}{1,4} \left(\frac{101\,475}{101\,325} \right)^{1/1,4}} \sqrt{2 \left[1 - \left(\frac{101\,325}{101\,475} \right)^{0,4/1,4} \right]} \approx 82,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 82,2 \text{ мм}^2.$$

Нетрудно определить, что величине $F_{\text{отв}} = 82,2 \text{ мм}^2$ соответствует диаметр отверстия $d_{\text{отв}} \approx 10,2 \text{ мм}$.

Также может быть оценено время защитного действия для экипажа из шести человек в салоне автомобиля экстренной службы истечения воздуха из 40-литрового баллона при давлении в нем воздуха $p_6 = 200 \text{ атм}$. Поскольку в таком баллоне содержится 8 м^3 воздуха при атмосферном давлении, а экипаж может потреблять воздух в количестве примерно $3,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, то защитного действия этого баллона хватит более чем на 2 ч, что вполне достаточно для выполнения задачи.

Поскольку обеспечить полную герметизацию салона для автомобилей всех экстренных служб сложно, следует ожидать истечения воздуха из него наружу через неплотности. В этой связи целесообразно оценить общую площадь $F_{\text{нп}}$ неплотностей и сопоставить ее с ранее определенной величиной $F_{\text{отв}}$. Если $F_{\text{нп}} < F_{\text{отв}}$, то воздух из салона будет выходить наружу как через неплотности салона, так и через не полностью открытое выпускное отверстие. Если $F_{\text{нп}} \geq F_{\text{отв}}$, то в специальном выпускном отверстии нет необходимости — воздух наружу будет выходить через неплотности салона, следовательно, существует вероятность, что потребуется увеличить его расход из баллона.

Для оценки величины $F_{\text{нп}}$ можно предложить следующий способ. Увеличить давление в салоне автомобиля до $p_0 \gg 1,893 p_a$ (это обеспечит критический режим истечения воздуха через неплотности), а затем регистрировать падение давления в течение времени Δt до величины $p_k > 2 p_a$, что позволит по значениям $\Delta p = p_0 - p_k$ и Δt определить площадь $F_{\text{нп}}$. Для этого выражение (1) с нижней частью выражения (2) представим в виде дифференциального уравнения:

$$G = \frac{dm}{dt} = -\frac{\mu F_{\text{нп}}}{V} m \sqrt{\gamma R_b T_c \left(\frac{m}{m_0} \right)^{\gamma-1}} f(\gamma), \quad (5)$$

где m — текущая масса воздуха в салоне, кг;

t — время, отсчитываемое от начала процесса, с;

V — свободный объем салона, м^3 ;

γ — показатель политропы ($\gamma = 1$ соответствует изотермическому процессу, когда истечение медленное, и воздух в салоне успевает нагреваться от находящихся там оборудования

и предметов; $\gamma = k = 1,4$ — процесс адиабатический, истечение воздуха быстрое);

$m_0 = p_0 V / R_b T_c$ — начальная масса воздуха в салоне, кг;

параметр $f(\gamma)$ может быть найден по формуле:

$$f(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{e}} \approx 0,6065 & \text{при } \gamma = 1, \\ \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{0,5(\gamma+1)/(\gamma-1)} & \text{при } \gamma > 1. \end{cases} \quad (6)$$

Из решения дифференциального уравнения (5) с учетом (6) находим динамику массы воздуха в салоне:

$$m(t) = \begin{cases} m_0 \exp(-\mu F_{\text{нп}} K t) & \text{при } \gamma = 1, \\ \left[m_0^{-0,5(\gamma-1)} + \frac{\gamma-1}{2} \mu F_{\text{нп}} K t \right]^{-\frac{2}{\gamma-1}} & \text{при } \gamma > 1, \end{cases} \quad (7)$$

где $K = \frac{\sqrt{\gamma R_b T_c}}{V} f(\gamma)$, $(\text{м}^2 \text{с})^{-1}$.

После преобразований получаем выражение для оценки площади неплотностей $F_{\text{нп}}$:

$$\mu F_{\text{нп}} = \begin{cases} \frac{1}{K \Delta t} \ln \frac{p_0}{p_k} & \text{при } \gamma = 1, \\ \frac{2}{\gamma-1} \cdot \frac{\left(\frac{p_0}{p_k} \right)^{0,5(\gamma-1)/\gamma} - 1}{K \Delta t} & \text{при } \gamma > 1. \end{cases} \quad (8)$$

Например, при $V = 1 \text{ м}^3$, $R_b = 287,1 \text{ Дж} (\text{кг} \cdot \text{К})^{-1}$, $T_c = 293 \text{ К}$, $\mu = 0,8$ с учетом, что падение давления воздуха в салоне с $p_0 = 0,25 \text{ МПа}$ до $p_k = 0,20 \text{ МПа}$ произошло в течение $\Delta t = 60 \text{ с}$, расчетные величины $F_{\text{нп}}$ при $1,0 \leq \gamma \leq 1,4$ (так как мы заранее не знаем особенностей теплообмена воздуха в салоне) приведены в таблице.

Расчетные величины площади неплотностей в салоне автомобиля

Design values of uninsulated areas in the car salon

γ	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
$F_{\text{нп}}, \text{ мм}^2$ $F_{u,a}, \text{ мм}^2$	26,40	23,31	20,79	18,72	16,98

Поскольку выполняется условие $F_{\text{отв}} > F_{\text{нп}}$, выпускное отверстие салона может быть открыто частично.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что с учетом подпора воздуха в салоне и применения тепловизора водителем возможно обеспечить безопасное следование автомобиля экстренной службы к месту вызова в условиях задымления. Кроме того, применение тепловизора позволит обеспечить безопасное движение автомобиля в условиях тумана, сильного снегопада и по неосвещенной дороге ночью (см. рис. 1, *b–d*).

Движение автомобиля при подтоплении и повреждении дороги

Помимо пожаров, в современном мире происходит множество различных ЧС, требующих скорейшего прибытия автомобилей экстренных служб

[24–30]: подтоплений (рис. 7), землетрясений, приводящих к повреждениям дорожной сети (рис. 8, *a*), также осложнений дорожной обстановки в горной местности (рис. 8, *b*).

Это налагает особые требования на автомобили экстренных служб — они должны прибывать к местам вызова по подтопленным и поврежденным дорогам, а также иметь возможность безаварийно двигаться в горной местности.

Для решения данной проблемы была предложена новая конструктивно-компоновочная схема автомобиля [5], особенность которой заключается в высоком размещении двигательной установки. Соответствующая схема применительно к пожарной автоцистерне показана на рис. 9.

Такая конструктивно-компоновочная схема позволяет: а) двигаться по затопленной местности (см. рис. 7) без риска попадания воды и грязи в двигательную установку 3 (см. рис. 9); б) улучшить ох-



a



b

Рис. 7. Подтопление дорожной инфраструктуры: *a* — улицы; *b* — загородной трассы

Fig. 7. The flooded infrastructure: *a* — of a street; *b* — of a rural road



a



b

Рис. 8. Сложные дорожные условия: *a* — шоссе после землетрясения; *b* — дорога в горах

Fig. 8. Hazardous driving conditions: *a* — a post-earthquake highway; *b* — a road in the mountains

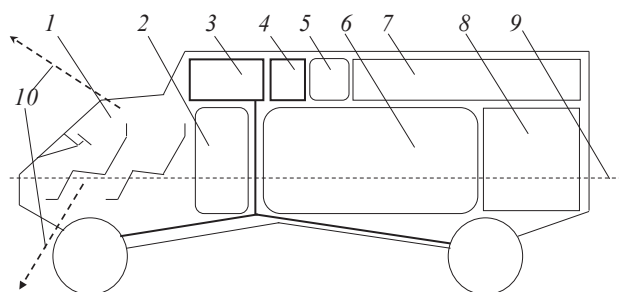


Рис. 9. Конструктивно-компоновочная схема автоцистерны, предназначенной для движения в сложных дорожных условиях: 1 — кабина экипажа; 2 — емкость с пенообразователем; 3 — ДВС; 4 — насос; 5 — топливный бак; 6 — емкость для воды; 7 — рукавный отсек; 8 — отсек для инструментов; 9 — допустимый уровень воды; 10 — сектор обзора

Fig. 9. The structural layout diagram of a tank motorcar, designated for hazardous driving conditions: 1 — the crew cabin; 2 — the blowing agent tank; 3 — the internal combustion engine; 4 — the pump; 5 — the gasoline tank; 6 — the water tank; 7 — the sleeve compartment; 8 — the instrument compartment; 9 — the acceptable water level; 10 — the field of view

лаждение двигателя; в) обеспечить обзор в нижней части кабины 1 (см. рис. 9) (водитель может видеть дорогу непосредственно под собой), что важно

при движении в сложных дорожных условиях (см. рис. 8). Компенсация центровки обеспечивается низким расположением емкостей 2 и 6 для огне-тушащих веществ (см. рис. 9). Средства управления в кабине 1 (см. рис. 9) выполнены таким образом, что сохраняют работоспособность даже при попадании воды в кабину.

Выводы

Таким образом, приведены конструктивно-компоновочные схемы автомобилей экстренных служб (пожарных, полицейских, скорой медицинской помощи и др.), позволяющие обеспечивать безопасное прибытие экипажей к месту вызова в сложных условиях: задымление от пожаров, туман, снегопад, отсутствие освещения в ночное время, подтопление местности, повреждение дорожного покрытия и т.п. На технические решения получены патенты РФ.

Данный материал подготовлен в рамках выполнения этапа плановой НИР «Разработка теоретических основ интеллектуальных сетей мониторинга и управления экологической безопасностью мультимодальных транспортных систем».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Патент РФ № 105833 U1. Пожарно-спасательный автомобиль с реверсивным движением для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ в тоннелях / М.В. Алешков, М.Е. Сочнев, Е.А. Емельянов, А.В. Плосконосов. № 2010134048/12, заявл.: 13.08.2010; опубл.: 27.06.2011. Бюл. № 18.
2. *Теребнев В.В., Подгруппный А.В.* Пожарная тактика. Основы тушения пожара. Екатеринбург : Калан, 2008. 512 с.
3. Патент РФ № 2756194 C1. Способ безопасного следования автомобиля экстренной службы к месту вызова и автомобиль для осуществления способа / И.Г. Малыгин, В.И. Комашинский, А.А. Таранцев. № 2020135941, заявл.: 30.10.2020 ; опубл.: 28.09.2021. Бюл. № 28.
4. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа : учебник для вузов. 7-е изд. испр. М. : Дрофа, 2003. 840 с.
5. Патент РФ № 2003551 C1. Автомобиль / А.А. Таранцев. № 925044023, заявл.: 25.05.1992.
6. *Богданов М.И., Архипов Г.Ф., Мясенков Е.И.* Справочник по пожарной технике и тактике : учебное пособие. СПб., 2007. 120 с.
7. *Potic I.* Remote sensing approach to forest fires monitoring // Environment Science and Policy for Sustainable Development. 2016. Vol. 4 (2). Pp. 47–51.
8. Arbeitskreis Waldbrand Im Deutschen Feuerwehrverband: Sicherheit und Taktik im Waldbrandeinsatz. AFZ-Der Wald. 2009. Vol. 14. Pp. 755–757.
9. *Müller C. et al.* Waldbrandschutz — Manuskript der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Waldbrandschutz. Caspers G. Waldbrandschutz. 2000. CD-ROM. aid.
10. *König H.-C.* Waldbrandschutz. Kompendium für Forst und Feuerwehr. Supplement Band 1, Hrsg. Mathias Bessel, Fachverlag Matthias Grimm, 2007. 197 s.
11. *Südmersen J., Cimolino U., Neumann N.* Wald- und Flächenbrandbekämpfung. Standard-Einsatz-Regeln. ecomed Sicherheit. 1. Auflage. 2008. 102 s.
12. *Горносталь С.А., Петухова О.А.* Аналіз вимог нормативних документів до проведення випробувань на водовіддачу // Збірник матеріалів наук.-прак. семінару «Профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій». Харків : НУЦЗУ, 2017. С. 13–14.
13. *Jonson R., Fenimore D.* Fire and flammability woods // Jour. Amer. chem. soc. A3, 1999. Pp. 460–467.

14. Коровин Г.Н., Исаев А.С. Охрана лесов от пожаров как важнейший элемент национальной безопасности России // Лесной бюллетень. 2006. № 8–9.
15. Моисеев Н.А. О каком прорыве в лесных делах России может и должна бы идти речь? // Лесной вестник/Forestry Bulletin. 2019. Т. 23. № 5. С. 8–15. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-8-15
16. Организация борьбы с лесными пожарами в США // Лесные пожары на территории России: состояние и проблемы / под общ. ред. Ю.Л. Воробьева. М. : Дэк-Пресс, 2004. 312 с.
17. Щербов Б.Л., Лазарева Е.В., Журкова И.С. Лесные пожары и их последствия (на примере сибирских объектов) / под науч. ред. Н.А. Рослякова. Новосибирск : Акад. изд-во «Гео», 2015. 154 с.
18. Шешуков М.А., Ковалев А.П., Орлов А.М., Позднякова В.В. Проблемы и перспективы охраны лесов от пожаров // Сибирский лесной журнал. 2020. № 2. С. 14–20. DOI: 10.15372/SJFS20200202
19. Фильков А.И. Физико-математическое моделирование возникновения природных пожаров и исследование особенностей сушки, пиролиза и зажигания горючих материалов : автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. Томск, 2014. 39 с.
20. Абрамов В.П. Анализ горимости лесов и оптимизация охраны их от пожаров в подзонах предлесостепных сосново-березовых лесов и северной лесостепи Тюменской области : дис. канд. сел.-хоз. наук. Екатеринбург, 2008. 148 с.
21. Кирсанов А.А. Моделирование распространения загрязняющих веществ в атмосфере при лесных пожарах : автореф. дис. канд. геогр. наук. М., 2015. 23 с.
22. Кректунов А.А. Научное обоснование системы охраны населенных пунктов от лесных пожаров на Среднем Урале : дис. канд. сел.-хоз. наук. Екатеринбург, 2016. 182 с.
23. Surkova G.V., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Revokatova A.P., Rivin G.S. Simulation of spread of air pollution plumes from forest fires with the use of COSMO-Ru7-ART chemical-transport model // Atmospheric and Oceanic Optics. 2014. Vol. 3. Pp. 268–274. DOI: 10.1134/S1024856014030105
24. Bui D.P., Pollack Porter K., Griffin S., French D.D., Jung A.M., Crothers S. et al. Risk management of emergency service vehicle crashes in the United States fire service: process, outputs, and recommendations // BMC public health. 2017. Vol. 17. No. 1. Pp. 1–11. DOI: 10.1186/s12889-017-4894-3
25. Missikpode C., Peek-Asa C., Young T., Hamann C. Does crash risk increase when emergency vehicles are driving with lights and sirens? // Accident Analysis & Prevention. 2018. Vol. 113. Pp. 257–262. DOI: 10.1016/j.aap.2018.02.002
26. Jang Dong-Ha, Ku Jae-Hyun, Jeong Jae-Han, Lim Woo-Sub. Comparison between Domestic and foreign technical standards to review the necessity of establishing a performance test system for high-pressure and high-flow fire pumps in fire trucks // Fire Science and Engineering. 2021. Vol. 35. No 4. Pp. 65–70. DOI: 10.7731/KIFSE.cc41f350
27. Usanov D., van de Ven P.M., van der Mei R.D. Dispatching fire trucks under stochastic driving times // Computers & Operations Research. 2020. Vol. 114. Pp. 104829. DOI: 10.1016/j.cor.2019.104829
28. Simeonov P., Hsiao H., Nimbarte A., Current R., Ammons D., Choi H.-S. et al. Evaluation of advanced curve speed warning system for fire trucks // Applied ergonomics. 2021. Vol. 97. P. 103527. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103527
29. Nowicki T. Optimization of equipment deployment on fire trucks // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2017. Vol. 125. P. 02016. DOI: 10.1051/mateconf/201712502016
30. Hariyani M.L., Astor Y. Determination of the fastest route for fire trucks in Cirebon city based on distance, time, congestion and land use // Journal of Green Science and Technology. 2021. Vol. 5. No. 1. DOI: 10.33603/jgst.v5i1.4905

REFERENCES

1. RF patent No. 105833 U1. *Fire-and-rescue vehicle with reverse movement for extinguishing fires and carrying out rescue operations in tunnels*. Aleshkov M.V., Sochnev M.E., Emelyanov E.A., Ploskonosov A.V. No. 2010134048/12, appl.: August 13, 2010; publ.: June 27, 2011. Bull. No. 18. (rus).
2. Terebnev V.V., Podgrushny A.V. *Fire tactics. Basics of fire fighting*. Ekaterinburg, Kalan Publ., 2008; 512. (rus).

3. RF patent No. 2756194 C1. *A method for safely following an emergency vehicle to the place of a call and a vehicle for implementing the method.* Malygin I.G., Komashinsky V.I., Tarantsev A.A. No. 2020135941, appl.: October 30, 2020; publ.: September 28, 2021. Bull. No. 28. (rus).
4. Loitsyansky L.G. *Mechanics of fluid and gas: a textbook for universities.* 7th ed. Moscow, Drofa Publ., 2003; 840. (rus).
5. RF patent No. 2003551 C1. *Car* / A.A. Tarantsev. No. 925044023, appl: 05/25/1992. (rus).
6. Bogdanov M.I., Arkhipov G.F., Myastenkov E.I. *Handbook of Fire Engineering and Tactics : A Study Guide.* Saint Petersburg, 2007; 120. (rus).
7. Potic I. Remote sensing approach to forest fires monitoring. *Environment Science and Policy for Sustainable Development.* 2016; 4(2):47-51.
8. *Arbeitskreis Waldbrand Im Deutschen Feuerwehrverband: Sicherheit und Taktik im Waldbrandeinsatz.* AFZ-Der Wald. 2009; 14:755-757. (ger).
9. Müller C. et al. *Waldbrandschutz — Manuskript der Bund-Länder-Arbeitsgruppe Waldbrandschutz.* Caspers G. Waldbrandschutz. 2000. CD-ROM. aid. (ger).
10. König H.-C. *Waldbrandschutz. Kompendium für Forst und Feuerwehr.* Supplement Band 1, Hrsg. Mathias Bessel, Fachverlag Matthias Grimm, 2007; 197. (ger).
11. Südmersen J., Cimolino U., Neumann N. Wald- und Flächenbrandbekämpfung. *Standard-Einsatz-Regeln.* ecomed Sicherheit. 1. Auflage. 2008; 102. (ger).
12. Gornostal S.A., Petukhova O.A. Аналіз вимог нормативних документів до проведення випробувань на водовіддачу. *Профілактика, попередження та ліквідація надзвичайних ситуацій : збірник матеріалів наук.-прак. семінару.* Kharkiv, NUZU, 2017; 13-14. (ukr).
13. Jonson R., Fenimore D. Fire and flammability woods. *Journal of the American Chemical Society.* 1999; 460-467.
14. Korovin G.N., Isaev A.S. Protection of forests from fires as the most important element of Russia's national security. *Forest Bulletin.* 2006; 8-9. (rus).
15. Moiseev N.A. What kind of breakthrough in the forest affairs of Russia can and should be discussed? *Lesnoy vestnik/Forestry Bulletin.* 2019; 23(5):8-15. DOI: 10.18698/2542-1468-2019-5-8-15(rus).
16. Organization of the fight against forest fires in the United States. *Forest fires in Russia: state and problems.* Yu.L. Vorobyov (ed.). Moscow, Dex-Press Publ., 2004; 312. (rus).
17. Shcherbov B.L., Lazareva E.V., Zhurkova I.S. *Forest fires and their consequences (on the example of Siberian objects).* N.D. Roslyakov (ed.). Novosibirsk, Acad. Geo Publishing House, 2015; 154. (rus).
18. Sheshukov M.A., Kovalev A.P., Orlov A.M., Pozdnyakova V.V. Problems and prospects of forest fire protection. *Siberian Forest Journal.* 2020; 2:14-20. DOI: 10.15372/SJFS20200202 (rus).
19. Filkov A.I. *Physico-mathematical modeling of the occurrence of natural fires and the study of the characteristics of drying, pyrolysis and ignition of combustible materials : abstract of the dissertation of Doctor of Physical and Mathematical Sciences.* Tomsk, 2014; 39. (rus).
20. Abramov V.P. *Analysis of forest fires and optimization of their protection from fires in the subzones of preforest-steppe pine-birch forests and the northern forest-steppe of the Tyumen region : dissertation of the candidate of agricultural sciences.* Ekaterinburg, 2008; 148. (rus).
21. Kirsanov A.A. *Modeling the spread of pollutants in the atmosphere during forest fires : abstract of the dissertation of the candidate of geographical sciences.* Moscow, 2015; 23. (rus).
22. Krektunov A.A. *Scientific substantiation of the system of protection of settlements from forest fires in the Middle Urals : dissertation of the candidate of agricultural sciences.* Ekaterinburg, 2016; 182. (rus).
23. Surkova G.V., Blinov D.V., Kirsanov A.A., Revokatova A.P., Rivin G.S. Simulation of spread of air pollution plumes from forest fires with the use of COSMO-Ru7-ART chemical-transport model. *Atmospheric and Oceanic Optics.* 2014; 3:268-274. DOI: 10.1134/S1024856014030105
24. Bui D.P., Pollack Porter K., Griffin S., French D.D., Jung A.M., Crotherset S. et al. Risk management of emergency service vehicle crashes in the United States fire service: process, outputs, and recommendations. *BMC public health.* 2017; 17(1):1-11. DOI: 10.1186/s12889-017-4894-3
25. Missikpode C., Peek-Asa C., Young T., Hamann C. Does crash risk increase when emergency vehicles are driving with lights and sirens? *Accident Analysis & Prevention.* 2018; 113:257-262. DOI: 10.1016/j.aap.2018.02.002
26. Jang Dong-Ha, Ku Jae-Hyun, Jeong Jae-Han, Lim Woo-Sub. Comparison between Domestic and foreign technical standards to review the necessity of establishing a performance test system for high-pressure and high-flow fire pumps in fire. *Fire Science and Engineering.* 2021; 35(4):65-70. DOI: 10.7731/KIFSE.cc41f350

27. Usanov D., van de Ven P.M., van der Mei R.D. Dispatching fire trucks under stochastic driving times. *Computers & Operations Research*. 2020; 114:104829. DOI: 10.1016/j.cor.2019.104829
28. Simeonov P., Hsiao H., Nimbarte A., Current R., Ammons D., Choi H.-S. et al. Evaluation of advanced curve speed warning system for fire trucks. *Applied ergonomics*. 2021; 97:103527. DOI: 10.1016/j.apergo.2021.103527
29. Nowicki T. Optimization of equipment deployment on fire trucks. *MATEC Web of Conferences*. EDP Sciences, 2017; 125:02016. DOI: 10.1051/mateconf/201712502016
30. Hariani M.L., Astor Y. Determination of the fastest route for fire trucks in Cirebon city based on distance, time, congestion and land use. *Journal of Green Science and Technology*. 2021; 5(1). DOI: 10.33603/jgst.v5i1.4905

*Поступила 15.10.2021, после доработки 15.11.2021;
принята к публикации 26.11.2021*

*Received October 15, 2021; Received in revised form November 15, 2021;
Accepted November 26, 2021*

Информация об авторах

МАЛЫГИН Игорь Геннадьевич, д-р техн. наук, профессор, директор Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук; Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, 13; профессор Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Заслуженный работник высшей школы РФ, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; Scopus Author ID: 57159964300; ResearcherID: E-2182-2018; ORCID: 0000-0002-0403-8095; e-mail: info@iptran.ru

ТАРАНЦЕВ Александр Алексеевич, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией Института проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Россия, 199178, г. Санкт-Петербург, 12-я Линия ВО, 13; профессор Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

Вклад авторов:

Малыгин И.Г. — Идея автомобиля по патенту РФ № 2756194 C1, сбор и анализ материалов по неблагоприятным дорожным условиям, написание и научное редактирование статьи, сбор и анализ публикаций по тематике статьи.

Таранцев А.А. — Идея автомобилей по патентам РФ № 2756194 C1 и № 2003551 C1, проведение газодинамических расчетов, подготовка текста статьи, участие в сборе публикаций по тематике статьи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Igor G. MALYGIN, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-ya Liniya VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; Scopus Author ID: 57159964300; ResearcherID: E-2182-2018; ORCID: 0000-0002-0403-8095; e-mail: info@iptran.ru

Alexander A. TARANTSEV, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Laboratory of Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, 12-ya Liniya VO, 13, Saint Petersburg, 199178, Russian Federation; Professor of Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; Scopus Author ID: 57195636448; ResearcherID: K-2087-2018; ORCID: 0000-0003-1561-2483; e-mail: t__54@mail.ru

Contribution of the authors:

Igor G. Malygin — The idea of a car according to the patent of the Russian Federation No. 2756194 C1, collection and analysis of materials on adverse road conditions, writing and scientific editing of the article, collection and analysis of publications on the subject of the article.

Alexander A. Tarantsev — The idea of cars according to the patents of the Russian Federation No. 2756194 C1 and No. 2003551 C1, performing gas-dynamic calculations, preparing the text of the article, participating in the collection of publications on the subject of the article.

The authors declare no conflicts of interests.

ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021. Т. 30. № 6. С. 108–113
POZHAROVZRYVOBEZOPASNOST/FIRE AND EXPLOSION SAFETY. 2021; 30(6):108-113

УДК 614.849/ 311.3

Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1

Александр Сергеевич Харламенков ✉

Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий
стихийных бедствий, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Рассмотрена статистика пожаров от электроустановок по видам электрических изделий. Обоснована необходимость дальнейших поисков технических решений по защите электрических сетей от больших переходных сопротивлений. Представлены основные теоретические положения теории контакта. Показано влияние различных факторов на величину переходного сопротивления. Выполнено обобщение теоретических данных, позволяющих определить пути решения рассматриваемого вопроса.

Ключевые слова: пожарная безопасность; электрооборудование; контакт-деталь; дуговой пробой; эрозия контактов

Для цитирования: Харламенков А.С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1 // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2021. Т. 30. № 6. С. 108-113.

✉ Харламенков Александр Сергеевич, e-mail: h_a_s@live.ru

The fire hazard of large transition resistances. From theory to practice. Part 1

Aleksandr S. Kharlamenkov ✉

The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense,
Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

The statistics of fires at electric plants, broken down by the types of electric products, are considered. The need for a further search for technical solutions towards the protection of electric networks from large transient resistances is substantiated. Basic provisions of the contact theory are presented. The influence of various factors on the value of the transient resistance is shown. The generalization of theoretical data has been carried out, allowing to determine the ways of solving the problem under consideration.

Keywords: fire safety; electrical equipment; contact point; arc over; erosion of contacts

For citation: Kharlamenkov A.S. The fire hazard of large transition resistances. From theory to practice. Part 1. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2021; 30(6):108-113 (rus.).

✉ Aleksandr Sergeevich Kharlamenkov, e-mail: h_a_s@live.ru



ВОПРОС:

Ежегодные статистические данные о пожарах указывают на высокий уровень пожарной опасности в жилых зданиях, на которые приходится более 70 % всех пожаров [1]. Больше 20 тыс. пожаров происходит в комнатах и спальнях помещений, реже — в кухнях, коридорах, лоджиях (балконах) и ванных комнатах.

По причине нарушения правил эксплуатации электрооборудования и бытовых приборов в жилом секторе ежегодно происходит более 40 тыс. пожаров. На электропроводку приходится около 65 % пожаров среди всех электроустановок. Число пожаров от кабелей в 20–30 раз меньше, чем от проводов [2]. Это связано с большой протяженностью электропроводок по сравнению с кабельными ли-

ниями и более жесткими требованиями к монтажу последних. Кроме этого, собственники помещений зачастую самостоятельно выполняют прокладку электропроводки с значительными нарушениями правил монтажа и пожарной безопасности.

За последние 5 лет количество пожаров от выключателей, электрических розеток, разветвителей, (удлинителей) выросло почти в 2 раза и составляет около 6 % от общего числа пожаров (рис. 1). Это обстоятельство указывает на снижение контроля со стороны собственников помещений к эксплуатируемым электроустановочным изделиям. Рост пожароопасных показателей также связан с использованием электропроводки, выключателей, электрических розеток и удлинителей, которые уже израсходовали свой ресурс и имеют значительный

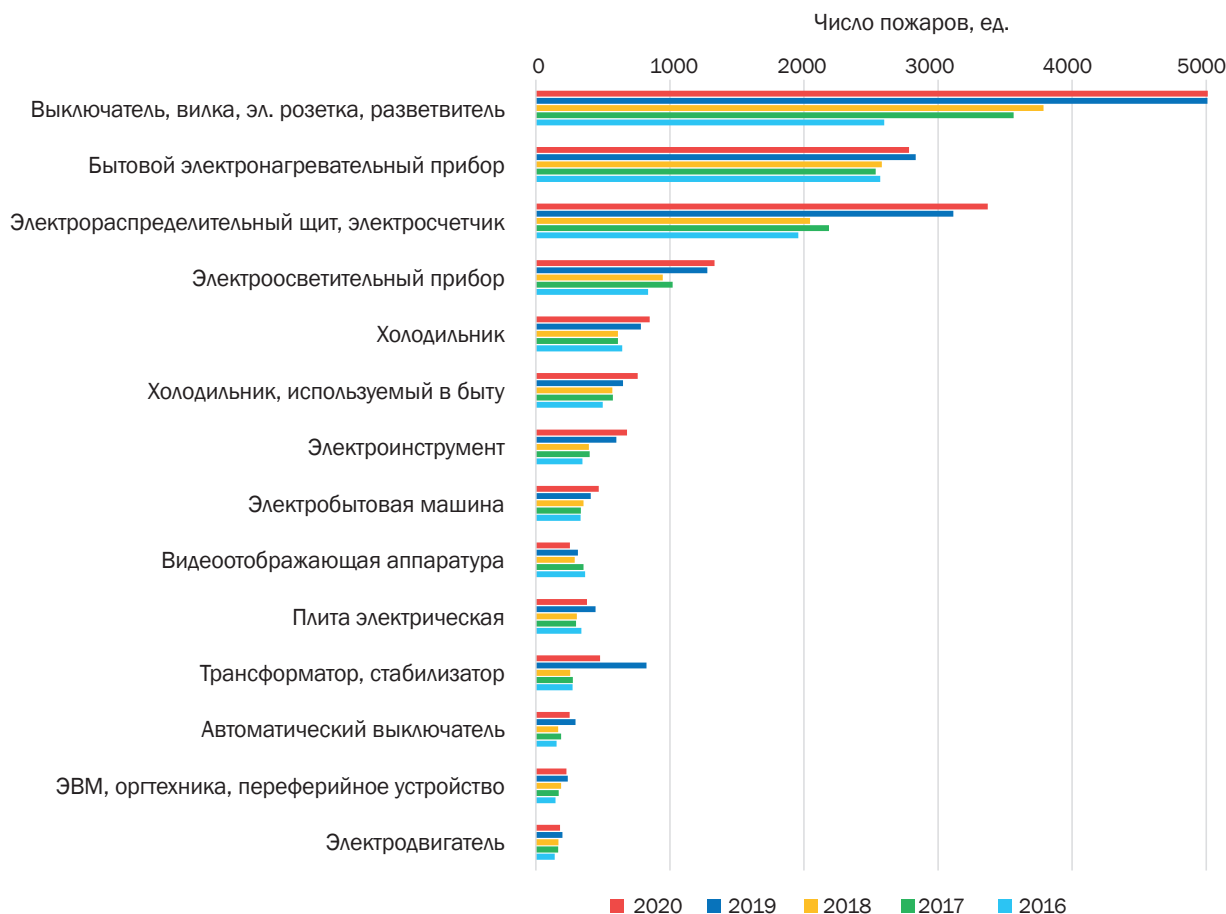


Рис. 1. Пожары от электрических изделий за 2016–2020 гг. [1] (за исключением проводов и кабелей)

износ. При этом количество подключаемой к сети нагрузки и общая потребляемая мощность приборов увеличиваются с каждым годом.

По состоянию на 2018 г. число семей, нуждающихся в улучшении жилищных условий, составляет более 2 млн, из которых только 4 % получили новые квартиры и улучшили свое положение, а более 6 % (121 тыс.) граждан продолжают проживать в ветхих и аварийных домах. В 2018 г. капитального ремонта требовали около 140 тыс. многоквартирных домов [3]. Только в 30 % из них выполнен ремонт, который обычно не включает в себя замену электропроводки, выключателей, розеток и других электроустановочных изделий в жилых помещениях.

Из представленных статистических данных следует, что ожидать улучшения обстановки с пожарами от электрооборудования в жилых зданиях в ближайшие годы не стоит. Поэтому остается надеяться на сознательность и озабоченность своей безопасностью собственников жилья, которым нужно помнить о поддержании в исправном состоянии используемых ими электроустановок.

В первую очередь, необходимо руководствоваться требованиями п. 35 Правил противопожарного режима РФ (ППР РФ)¹, которые указывают на не-

обходимость контроля со стороны собственника за исправным состоянием электрических сетей, аппаратов и устройств, а также бытовых приборов. Наибольшего внимания заслуживают работающие десятилетиями электрические сети и электроустановочные изделия, так как бытовые электрические приборы обновляются в доме чаще. Изоляция и оболочка проводов и кабелей имеет срок службы, в среднем 15–20 лет, который может значительно сокращаться из-за превышения рабочих температур проводника и окружающей его среды. Этот процесс называют старением изоляции. Он подробно рассмотрен в рубрике «Вопрос-ответ» № 1 журнала за 2019 г. [4].

На выход из строя электропроводок, выключателей, розеток и удлинителей влияют и пожароопасные режимы работы электрических сетей. К ним относятся короткие замыкания (КЗ), токовые перегрузки и большие переходные сопротивления (БПС) контактных соединений. Интересно, что появление одного пожароопасного состояния может спровоцировать появление другого. Так, длительная перегрузка обычно приводит к расплавлению изоляции соседних токоведущих жил и последующему появлению КЗ. Замыкание, в свою очередь, характеризуется протеканием по цепи больших токов, которые приводят к нагреву контакт-деталей и увеличению их переходного сопротивления. Наличие «плохого контакта», даже при протекании по цепи рабочего тока, ведет к повышению температуры соединенных про-

¹ Правила противопожарного режима в Российской Федерации (с изм. 21 мая 2021) : утверждены постановлением Правительства РФ от 16 сентября 2020 г. № 1479.

водников, где происходит постепенное разрушение изоляции, что аналогично процессам при токовой перегрузке.

Обнаружение КЗ и токовых перегрузок в большинстве случаев не представляет серьезной проблемы, так как с этой задачей эффективно справляются существующие аппараты защиты в виде плавких предохранителей, автоматических выключателей и тепловых реле. Но с БПС ситуация обстоит иначе. В силу того, что протекающий по сети ток практически не изменяется по величине, то и аппараты защиты никак на него не реагируют. Поэтому выявление мест «плохого контакта» является проблематичным. БПС обычно сопровождается: появлением неприятного запаха от оплавленных элементов электроустановочных изделий или изоляции проводов; нестабильной работой бытовых приборов; периодическим морганием ламп светильников. Перечисленные ситуации характерны не только для случаев появления БПС, но и для перепадов напряжения в электрической сети. В результате имеет смысл рассмотреть актуальный вопрос — какие современные технические решения используются в электрических сетях зданий для обнаружения БПС?

ОТВЕТ

Появление БПС чаще происходит в местах разрывных (разъемных) и скользящих контактов, нежели неподвижных (зажимных и цельнометаллических). Для зажимных контактов также характерно появление БПС в случае некачественного монтажа и/или нарушений регламента технического обслуживания [5]. Ухудшение качества зажимных контактов возможно и при периодически возникающих аварийных режимах в работе электрической сети. Например, при перегрузках или КЗ места болтовых соединений подвергаются нагреву электрическим током, который приводит к появлению значительных механических напряжений. Они, в свою очередь, создают остаточную деформацию и, как итог, ослабление контакта [6]. Для разъемных и скользящих контактов характерен большой износ мест соединения и окисление контактируемых поверхностей, особенно, если контакты большую часть времени находятся в разомкнутом состоянии.

Из теории контактирования известно, что на надежную работу контактов влияет множество факторов. Одним из основных является величина переходного сопротивления, которая может значительно изменяться в зависимости от контактного нажатия, чистоты обработки соединяемых поверхностей, наличия загрязнений, агрессивных

сред и влаги в воздухе, способствующих образованию плохо проводящих поверхностных пленок, температуры окружающей среды, зоны контактирования и самих контактов-деталей, величины тока, протекающего через места соединений проводников, габаритных размеров и физико-химических свойств металла контакт-деталей [7].

Нужно понимать, что переходное сопротивление практически не зависит от габаритных размеров контактируемых поверхностей и уменьшается с увеличением силы контактного нажатия. При наложении одной контактируемой детали на другую их фактическая поверхность механического соприкосновения во много раз меньше видимой. Это обусловлено тем, что реальная поверхность контакт-детали весьма неоднородна и имеет множество микровыступов и углублений. Именно соединение между микровыступами и создает зоны электрического контакта (рис. 2, а).

Такие участки при отсутствии на них оксидных, сульфидных и других пленок с высоким удельным сопротивлением называют а-пятнами, которые образуют зону стягивания с сопротивлением $R_{ст} = \rho/2r_{\phi}$, где ρ — удельное сопротивление материала при заданной температуре контакт-детали, Ом·мм; r_{ϕ} — фактический радиус площадки соприкосновения деталей.

Плотность тока в зонах стягивания намного выше, чем в остальном теле проводника, и может достигать величин 10^7 А/см² [8].

Площадь суммарной фактической поверхности соприкосновения $S_{с.ф}$, м², можно определить по формуле [7]:

$$S_{с.ф} = F_k/H,$$

где F_k — контактное нажатие, Н;

H — микротвердость металла контакт-детали, Па.

Как видно из формулы, чем больше контактное нажатие и ниже микротвердость металла, тем больше площадь соприкосновения $S_{с.ф}$ и, следовательно, меньше величина переходного сопротивления. Увеличение числа контактируемых точек на поверхности контакт-деталей при дополнительном контактном нажатии F_k увеличивает общую контактную площадь, снижая величину переходного сопротивления (рис. 2, б). Микротвердость определяется экспериментальным путем, зависит от вида металла (сплава), его механической обработки и температуры нагрева контакт-деталей. Для меди $H = 590...1470$ МПа, а для латуни и бронзы — $H = 500...1600$ МПа [7].

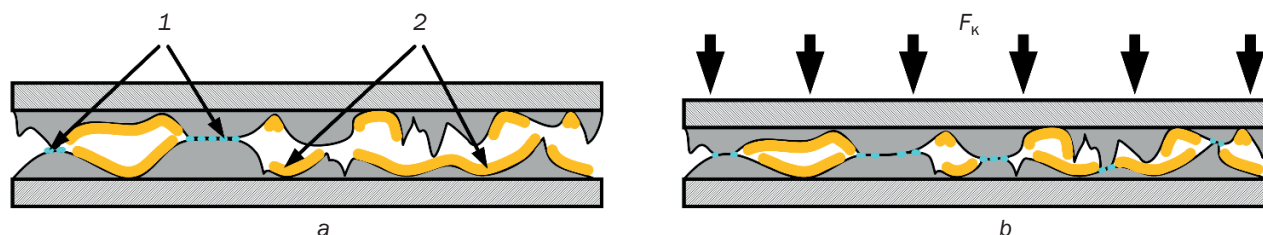


Рис. 2. Соприкосновение двух контакт-деталей: а — без контактного нажатия; б — с контактным нажатием F_k ; 1 — тонкие (квазиметаллические) пленки; 2 — толстые (оксидные, сульфидные) пленки

Помимо зоны металлического контакта с сопротивлением $R_{ст}$ всегда присутствуют зоны с тонкими пленками (квазиметаллические), обычно представляющие собой поверхностные адгезионные слои атомов кислорода, образующиеся в результате воздействия воздуха на чистую поверхность металла. Их наличие увеличивает общее сопротивление контакта. Для контакт-деталей, выполненных из меди, алюминия и их сплавов, сопротивление квазиметаллической зоны намного больше, чем $R_{ст}$.

Более толстые пленки органического и неорганического происхождения образуются в местах отсутствия физического контакта между деталями, а также в случае электрических (дуговых) разрядов при коммутации контакт-деталей. Сопротивление таких пленок на несколько порядков выше сопротивления зоны «чистого» металлического контакта. В результате, общее переходное сопротивление будет представлять суммарное сопротивление параллельно соединенных поверхностей с их сопротивлениями стягивания. Сопротивление пленок в расчетах переходных сопротивлений учитывается в виде повышающего коэффициента. Для различных пар металлов и типов контактов этот коэффициент подбирается отдельно.

В общем виде переходное сопротивление для хорошо зачищенного от оксидов контактных поверхностей можно выразить формулой [7, 8]:

$$R_{пер} = k/F_k^n,$$

где k — коэффициент, зависящий от физических свойств металла контакт-детали, степени ее окисления и вида контакта (табл. 1);

n — коэффициент, определяемый опытным путем для различных видов контактов, который колеблется в пределах от 0,5...0,7 (табл. 2).

По причине наличия у разъемных контактных поверхностей слоя оксидных пленок сила нажатия F_k будет играть определяющую роль в обеспечении надежного контакта. Она должна быть такой, чтобы преодолеть упругую и добиться пластической деформации, при которой часть тонких и оксидных пленок будет разорвана. При этом увеличится количество точек соприкосновения, а значит, и фактическая площадь контактирования. Чем меньше контактных точек, тем большая плотность тока будет приходиться на каждую из них. Наличие пленок будет увеличивать общее контактное сопротивление и количество выделяемого тепла в местах действительного соприкосновения.

Присутствие пыли на поверхностях замыкаемых контактов может значительно увеличивать переходное сопротивление и снижать качество соединения. Так, в случае упругого взаимодействия между латунными контактами и частицами пыли диаметром 10...20 мкм, вероятность отказа возрастает на 15 % при концентрации пыли 20 частиц на 1 мм². Увеличение концентрации пыли до 50 частиц на 1 мм² повышает вероятность отказа в 3 раза [9].

Для окисляющихся материалов (сталь, медь, алюминий и др.) температура контактов при их длительной работе

должна находиться в диапазоне 50...70 °С и не должна превышать 80 °С [7]. Превышение данного температурного режима будет сопровождаться резким возрастанием скорости коррозии из-за активного образования пленок. Ограничение температуры контактов обусловлено рабочими режимами диэлектриков (пластиков), используемых в конструкциях электроустановочных изделий [8].

При дальнейшем увеличении температуры (протекающего тока) переходное сопротивление плавно растет,

Таблица 1. Значения коэффициента k для различных пар контакт-деталей (при отсутствии оксидных пленок) [7]

Вид металла пары контакт-деталей	Значение коэффициента $k \cdot 10^{-3}$
Медь – медь*	0,14...0,18
Медь – медь**	0,08...0,14
Медь – медь***	0,07...0,10
Медь – латунь	0,38
Латунь – латунь	0,67
Латунь – сталь	3,04
Медь – сталь	3,1
Сталь – сталь	7,6
Алюминий – алюминий	0,127
Алюминий – латунь	1,85
Алюминий – сталь	4,4
Алюминий – медь	0,98
* Точечный контакт.	
** Плоский контакт.	
*** Луженые поверхности.	

Таблица 2. Значения опытного коэффициента n для контактов различного вида [7]

Вид контакта	Значение коэффициента n
Розеточный	0,75
Линейный	0,7
Стыковой	0,5...1,0
Пакетно-пластинчатый	1,0
Пальцевый	0,5...0,67
Контакты «шар – шар», «шар – плоскость»:	
при пластической деформации	0,5
при упругой деформации	0,33
Разборное контактное соединение	0,5...0,7

а в месте с ним и падение напряжения на контактах ΔU . При достижении некоторой пороговой величины $\Delta U_{кр}$ переходное сопротивление начинает уменьшаться (для меди $\Delta U_{кр} = 0,09...0,13$ В [8]). Это связано с достижением температуры, при которой в месте контакта происходит потеря прочности металла и его рекристаллизация. Контактирующие выступы начинают размягчаться, и площадь фактического контакта увеличивается. Температура рекристаллизации для меди составляет $150...270$ °С, для латуни — $250...350$ °С. При температурах выше критической (400 °С) у большинства металлов происходит сильное размягчение и возможно последующее расплавление в зоне контакта.

Ослабление контакта в местах расплавления металла и наличия оксидных пленок может приводить к появлению дуговых пробоев, образующих еще больше мест плавления, вокруг которых быстро формируются пленки. При напряжениях немного ниже $\Delta U_{кр}$ (напряжение фриттинга) может происходить локальный пробой пленок с резким возрастанием тока и таким же снижением сопротивления, которое будет продолжаться до установления в цепи напряжения $0,3...0,5$ В [6, 8, 10]. При этом наблюдается образование проводящих металлических мостиков (мостиковая эрозия), которые при дальнейшем соединении и разъединении контактов изменяют рельеф их поверхности и снижают надежность соединения. Явление пробоя толстых пленок обычно называют А-фриттингом, а тонких — В-фриттингом. Установлено, что определяющим фактором возникновения фриттинга является достижение определенной величины напряженности поля $E \approx 10^6$ В/см (для окисных пленок) [6, 10]. Протекание зарядов через узкие диэлектрические зазоры в пленках при мостиковой эрозии осуществляется за счет термоэлектронной эмиссии (выбивания электронов из металла) и туннелирования [11].

Более сильный дуговой пробой (ДП) приводит к дуговой эрозии и определяет коммутационный ресурс контакта. Электрическая дуга вызывает нагрев, плавление и испарение контакт-деталей, а также перенос части метал-

ла одного контакта на другой с образованием впадин и бугорков на контактных поверхностях. Наибольший негативный эффект от ДП наблюдается при размыкании контактов [7]. Наличие емкости и индуктивности в цепи способствует появлению ДП при коммутации. Образование дуги возможно при достижении определенных токов и напряжений в контакт-деталях. Для меди явление дуговой эрозии следует учитывать при напряжении и токе, превышающих 25 В и $1,3$ А. В момент размыкания в случае отсутствия с цепи индуктивности при меньших значениях напряжения и тока дуга не образуется, а возникает мостиковая эрозия [8].

Исследования показали, что при уменьшении площади перекрытия плоских контактов в сочетаниях материалов медь – медь, медь – латунь и медь – нержавеющая сталь, самые высокие показатели контактных сопротивлений и температуры нагрева контакт-деталей были определены у пары медь – латунь, а самые малые — у пары медь – медь. При размыкании контактов электрическая дуга в паре медь – латунь при идентичных условиях формировалась намного чаще, чем у остальных пар [12].

По представленным выше сведениям можно заключить, что основные практические способы обнаружения БПС можно реализовать путем контроля (мониторинга):

- силы контактного нажатия;
- температуры контакт-деталей и мест их соединения;
- падения напряжения или переходного сопротивления в контактном соединении;
- температуры изоляционных материалов и конструктивных элементов электрических изделий, соприкасающихся или находящихся вблизи контакт-деталей;
- появления электрической дуги (искрений) в местах ослабления контактов;
- внешнего вида и наличия деформаций, повреждений, запыленности, окисления разъемных элементов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году. Статистический сборник / под общ. ред. Д.М. Гордиенко. М. : ВНИИПО. 2021. 112 с.
2. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок. М. : ООО «Кабель», 2009. 328 с.
3. Жилищное хозяйство в России. 2019. Статистический сборник. М., 2019. 78 с.
4. Харламенков А.С. Нагревостойкость изоляции электроустановок // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2019. Т. 28. № 1. С. 77–79.
5. Смелков Г.И. Пожарная опасность электропроводок при аварийных режимах : учебное пособие. М. : Энергоатомиздат, 1984. 184 с.
6. Материалы в приборостроении и автоматике : справочник. 2-е изд. М. : Машиностроение, 1982. 528 с.
7. Адоньев Н.М., Афанасьев В.В., Борисов В.В. и др. Справочник по расчету и конструированию контактных частей силовых электрических аппаратов / под ред. В.В. Афанасьева. Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1988. 384 с.
8. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А., Иванова Н.Ю., Шилкин Д.А. Соединители и коммутационные устройства : Учебное пособие. СПб. : СПбГУ ИТМО, 2007. 151 с.

9. Lyuminarskaja E., Lyuminarsky I., Selivanov K. Theoretical study of electrical contact dustiness impact on the transition resistance // MATEC Web Conf. 2018. Vol. 224. 6 p.
10. Сафонов Л., Сафонов А. Электрические прямоугольные соединители. Фриттинг окисных пленок на электрических контактах // Технологии в электронной промышленности. 2001. № 3. С. 44-49.
11. Сорокин В.С., Антипов Б.Л., Лазарева Н.П. Материалы и элементы электронной техники. Проводники, полупроводники, диэлектрики : учебник. Т. 1. 2-е изд., испр. СПб. : Лань, 2015. 448 с.
12. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M. The impact of an incomplete overlap of a copper conductor and the corresponding terminal on the contact temperature // IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology. 2017. Vol. 7. No. 10. Pp. 1644–1654. DOI: 10.1109/TCPMT.2017.2720421

Материал поступил в редакцию 01.12.2021

Received December 1, 2021

Информация об авторе

ХАРЛАМЕНКОВ Александр Сергеевич, заместитель начальника кафедры специальной электротехники, автоматизированных систем и связи, Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; РИНЦ ID: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

Information about the author

Aleksandr S. KHARLAMENKOV, Deputy Head of Department of Special Electrical Engineering, Automation Systems and Communication, The State Fire Academy of the Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; ID RISC: 763967; e-mail: h_a_s@live.ru

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ ЗА 2021 г.

А

- Абашкин А.А. см. Присадков В.И., № 1
 Абашкин А.А. см. Присадков В.И., № 3
 Акперов Р.Г. см. Пузач С.В.
 Актерский Ю.Е. см. Королева Л.А.
 Андрюшкин А.Ю., Киришина А.А., Кадочникова Е.Н.
 Оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках, № 4, 14
 Асеева Р.М. см. Круглов Е.Ю.

Б

- Бабиков И.А. см. Танклевский Л.Т., № 1
 Бабиков И.А. см. Танклевский Л.Т., № 3
 Бакиров И.К., Валиуллина Р.А. Нормативно-техническое регулирование производственных объектов, связанное с предстоящими изменениями в «Техническом регламенте о требованиях пожарной безопасности», № 2, 5
 Барбин Н.М. см. Титов С.А.
 Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П.
 О пожарной безопасности в сельской местности России, № 6, 87
 Бутузов С.Ю. см. Топольский Н.Г.
 Буцынская Т.А. см. Членов А.Н.

В

- Валиуллина Р.А. см. Бакиров И.К.
 Вилисов В.Я. см. Топольский Н.Г.
 Воросин А.О., Парфененко А.П. Исследование влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите, № 3, 16

Г

- Гвоздев Е.В. Постановка проблемы по рациональному распределению ресурса, предназначенного для обеспечения комплексной безопасности предприятия, № 2, 35
 Голов Н.В. см. Константинова Н.И.
 Гомозов А.В. см. Горшков В.С.
 Горев В.А. Модельная нагрузка при внутреннем взрыве, № 3, 5
 Горшков В.С., Гомозов А.В., Павлов В.В., Фомина О.В.
 Основные итоги актуализации положений свода правил «Системы противопожарной защиты. Обес-

печение огнестойкости объектов защиты» с учетом новых требований сводов правил в области строительства, № 4, 5

Гравит М.В. см. Клементьев Б.А.

Григорьева М.П. см. Брушлинский Н.Н.

Е

- Еремينا Т.Ю., Сушкова О.В. Экспериментальное исследование пожароопасных характеристик материалов в помещениях зданий культурно-исторического наследия, № 6, 61
 Еремينا Т.Ю. см. Пузач С.В.
 Ершов А.В., Коробко В.Б. Новые ориентиры профессиональной культуры лиц, регулирующих отношения в области пожарной безопасности, № 4, 74
 Ершов А.В., Коробко В.Б. О проблеме перехода государственного управления в техносфере на новую риск-ориентированную модель на примере обеспечения пожарной безопасности, № 2, 98
 Ершов А.В., Коробко В.Б. Проблема актуального социального регулирования в техносфере на примере пожарной безопасности, № 1, 75

З

- Зубань А.В. см. Константинова Н.И., № 1
 Зубань А.В. см. Константинова Н.И., № 6
 Зубань О.П. см. Константинова Н.И.
 Зубань А.В. см. Шебеко А.Ю.
 Зуева А.С. см. Присадков В.И.
 Зыбина О.А. см. Танклевский Л.Т.
 Зыков В.И. см. Лебедченко О.С.

И

- Ивахнюк Г.К. см. Королева Л.А.

К

- Кадочникова Е.Н. см. Андрюшкин А.Ю.
 Калач А.В. см. Клементьев Б.А.
 Карасев С.В. см. Цариченко С.Г.
 Киришина А.А. см. Андрюшкин А.Ю.
 Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов, № 5, 5
 Кобелев А.М. см. Титов С.А.
 Кокшаров А.В. см. Осипенко С.И.

Константинова Н.И., Зубань А.В., Поединцев Е.А., Голов Н.В. Оценка пожарной опасности материалов палаток детских временных лагерей отдыха, № 1, 5

Константинова Н.И., Смирнов Н.В., Зубань А.В., Зубань О.П. Пожаробезопасное применение акустических материалов в зданиях культурно-зрелищного назначения, № 6, 13

Константинова Н.И. см. Корольченко О.Н.

Коробко В.Б. см. Ершов А.В., № 1

Коробко В.Б. см. Ершов А.В., № 2

Коробко В.Б. см. Ершов А.В., № 4

Королева Л.А., Хайдаров А.Г., Ивахнюк Г.К., Актерский Ю.Е. Применение потенциала горючести и эксергетического показателя для оценки пожарной опасности грузов железнодорожного транспорта, № 1, 16

Корольченко Д.А., Пузач С.В. Оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспыленной водой, № 1, 54

Корольченко Д.А., Пузач С.В. Учет механизма тушения пламени в интегральных и зонных моделях расчета динамики опасных факторов пожара в помещении, № 2, 78

Корольченко Д.А. см. Назаров В.П.

Корольченко Д.А. см. Пузач С.В.

Корольченко О.Н., Цариченко С.Г., Константинова Н.И. К вопросу о свойствах пожарной опасности огнезащитной древесины, № 2, 23

Круглов Е.Ю., Асеева Р.М. Беспламенное горение древесины: обугливание и характеристики тепловыделения, № 5, 30

Кузнецов К.Л. см. Плотникова Г.В.

Кузнецов К.Л. см. Степанов Р.Н.

Куприн Д.С., Поляков А.С. О точности и достоверности сравнительной оценки эффективности переносных огнетушителей при пожаротушении конструктивных и отделочных материалов автомобилей, № 2, 88

Л

Лебедченко О.С., Пузач С.В., Зыков В.И. Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара, № 4, 36

М

Малыгин И.Г., Таранцев А.А. Об обеспечении безопасного следования автомобиля экстренной службы в сложных дорожных условиях, № 6, 97

Морозов Р.О. см. Плотникова Г.В.

Мушлакова С.В. см. Присадков В.И.

Мустафин В.М. см. Пузач С.В.

Н

Назаров В.П., Корольченко Д.А., Швырков С.А., Тангиев М.М., Петров А.П. Особенности оценки уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров перед проведением огневых работ, № 6, 52

Назаров В.П. см. Швырков С.А.

Нехань Д.С. см. Полевода И.И.

О

Осипенко С.И., Кокшаров А.В. Увеличение устойчивости противопожарной пены путем восплавления жидкой фазы при орошении, № 4, 65

Островой А.В. см. Цариченко С.Г.

П

Павлов В.В. см. Горшков В.С.

Парфененко А.П. см. Воросин А.О.

Парфененко А.П. см. Холщевников В.В.

Петров А.П. см. Назаров В.П.

Петров А.П. см. Швырков С.А.

Плотникова Г.В., Кузнецов К.Л., Тимофеева С.С., Морозов Р.О., Шеков А.А. Теплые полы как причина возникновения пожаров, № 3, 41

Плотникова Г.В. см. Степанов Р.Н.

Поединцев Е.А. см. Константинова Н.И.

Полевода И.И., Нехань Д.С. Решение теплотехнической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн, № 2, 49

Полетаев Н.Л. Изменение температуры воздуха в 20-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера, № 5, 23

Полетаев Н.Л. Нагрев потока частиц встречным тепловым излучением, № 2, 15

Полетаев Н.Л. Взаимосвязь эмпирических закономерностей турбулентного горения аэрозвесей, № 6, 7

Поляков А.С. см. Куприн Д.С.

Поляков Д.В. см. Танклевский Л.Т.

Присадков К.В. см. Присадков В.И.

Присадков В.И., Мушлакова С.В., Ушаков Д.В., Абашкин А.А., Присадков К.В. Пожарная безопасность двухэтажных храмов, № 3, 65

Присадков В.И., Ушаков Д.В., Абашкин А.А., Зуева А.С. Экраны вокруг проемов в перекрытиях общественных зданий, № 1, 32

Пугачев М.Л. см. Цариченко С.Г.

Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки, № 6, 61

Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении, № 3, 76

Пузач С.В. см. Корольченко Д.А., № 1

Пузач С.В. см. Корольченко Д.А., № 2

Пузач С.В. см. Лебедченко О.С.

Пустовалов И.А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных установок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами, № 5, 84

Р

Роевко В.В., Чистяков Т.И., Тараканов Д.В., Халиков Р.В. Оценка электропроводимости струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования газокompрессорных станций, № 1, 64

Рукин М. Тепловизионный индикатор критического состояния «Снегирь» как средство сверххранного обнаружения места пожара или перегрева оборудования, № 2, 71

С

Семиков В.Л. см. Топольский Н.Г.

Смирнов Н.В. см. Константинова Н.И.

Соколов С.В. см. Брушлинский Н.Н.

Степанов Е.В., Тараканов Д.В., Топольский Н.Г. Волновой алгоритм определения оптимального маршрута движения газодымозащитников в зданиях при пожарах и задымлениях, № 3, 31

Степанов Р.Н., Шеков А.А., Плотникова Г.В., Кузнецов К.Л., Тимофеева С.С. Идентификация следов инициаторов горения в продуктах термического разложения ламинатов методом флуоресцентного анализа, № 4, 27

Сушкова О.В. см. Еремина Т.Ю.

Т

Тангиев М.М. см. Назаров В.П.

Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабилов И.А., Поляков Д.В. О расчетной оценке эффективности тушения пожара класса В спринклерными автоматическими установками, № 3, 88

Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Зыбина О.А., Бабилов И.А. Об оценке эффективности спринклерной автоматической установки пожаротушения, № 1, 42

Тараканов Д.В. см. Роевко В.В.

Тараканов Д.В. см. Степанов Е.В.

Таранцев А.А. см. Малыгин И.Г.

Таранцев А.А. см. Танклевский Л.Т., № 1

Таранцев А.А. см. Танклевский Л.Т., № 3

Тимофеева С.С. см. Плотникова Г.В.

Тимофеева С.С. см. Степанов Р.Н.

Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М. Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях, № 5, 66

Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я., Семиков В.Л. Модель эффективности реагирования в иерархической системе управления по оценкам готовности пожарных подразделений, № 5, 42

Топольский Н.Г. см. Степанов Е.В.

У

Ушаков Д.В. см. Присадков В.И., № 1

Ушаков Д.В. см. Присадков В.И., № 3

Ф

Фомина О.В. см. Горшков В.С.

Х

Хайдаров А.Г. см. Королева Л.А.

Халиков Р.В. см. Роевко В.В.

Харламенков А.С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к практике. Часть 1, № 6, 108

Харламенков А.С. Сухая трава и мусор в обновленной пожарной статистике, № 5, 98

Харламенков А.С. Целесообразность применения огнезащитных кабельных покрытий, № 4, 90

Харламенков А.С. Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя, № 2, 117

Харламенков А.С. Электропроводка во взрывоопасных зонах, № 1, 86

Холщевников В.В., Парфененко А.П. Интенсивность движения людских и транспортных потоков (обзор), № 4, 48

Ц

Цариченко С.Г., Островой А.В., Карасев С.В., Пугачев М.Л. Исследования возможности применения беспилотных авиационных систем для пожаротушения высотных зданий и сооружений, № 3, 54

Цариченко С.Г. см. Корольченко О.Н.

Ч

Чистяков Т.И. см. Роечко В.В.

Членов А.Н., Буцынская Т.А. Тенденции развития приемно-контрольных приборов для систем пожарной сигнализации, № 5, 76

Ш

Шеков А.А. см. Плотникова Г.В.

Шеков А.А. см. Степанов Р.Н.

Швырков С.А., Юрьев Я.И., Петров А.П., Назаров В.П.
Расчет фактического предела огнестойкости огражда-

ющей стены с волноотражающим козырьком группы мазутных резервуаров, № 6, 52

Швырков С.А. см. Назаров В.П.

Шебеко Ю.Н. см. Шебеко А.Ю.

Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В. Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре, № 5, 58

Ю

Юрьев Я.И. см. Швырков С.А.

ТЕМАТИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2021 г.

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
НОВОСТИ, КОНФЕРЕНЦИИ, ВЫСТАВКИ		
Учебно-консультационный семинар «Обоснование мероприятий по обеспечению пожарной безопасности объектов капитального строительства путем разработки специальных технических условий, стандартов организаций, расчетов и испытаний», 25 марта 2022 г., г. Москва, Россия	6	6
ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ		
Бакиров И.К., Валиуллина Р.А. Нормативно-техническое регулирование производственных объектов, связанное с предстоящими изменениями в «Техническом регламенте о требованиях пожарной безопасности»	2	5
Горшков В.С., Гомозов А.В., Павлов В.В., Фомина О.В. Основные итоги актуализации положений свода правил «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты» с учетом новых требований сводов правил в области строительства.	4	5
Клементьев Б.А., Калач А.В., Гравит М.В. Сравнительный анализ требований России и США к огнестойкости строительных конструкций нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов . .	5	5
ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ, ДЕТОНАЦИИ И ВЗРЫВА		
Горев В.А. Модельная нагрузка при внутреннем взрыве	3	5
Полетаев Н.Л. Взаимосвязь эмпирических закономерностей турбулентного горения аэрозвесей	6	7
Полетаев Н.Л. Изменение температуры воздуха в 20-литровой камере при добавлении воздуха из ресивера	5	23
Полетаев Н.Л. Нагрев потока частиц встречным тепловым излучением	2	15
БЕЗОПАСНОСТЬ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ		
Андрюшкин А.Ю., Киршина А.А., Кадочникова Е.Н. Оценка огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий стальных конструкций в высокотемпературных газовых потоках	4	14
Воросин А.О., Парфененко А.П. Исследование влияния прогрева от второстепенных стальных конструкций без огнезащиты на предел огнестойкости стальных балок в огнезащите.	3	16
Еремина Т.Ю., Сушкова О.В. Экспериментальное исследование пожароопасных характеристик материалов в помещениях зданий культурно-исторического наследия	6	24
Константинова Н.И., Зубань А.В., Поединцев Е.А., Голов Н.В. Оценка пожарной опасности материалов палаток детских временных лагерей отдыха	1	5
Константинова Н.И., Смирнов Н.В., Зубань А.В., Зубань О.П. Пожаробезопасное применение акустических материалов в зданиях культурно-зрелищного назначения.	6	13
Корольченко О.Н., Цариченко С.Г., Константинова Н.И. К вопросу о свойствах пожарной опасности огнезащищенной древесины	2	23
Круглов Е.Ю., Асеева Р.М. Беспламенное горение древесины: обугливание и характеристики тепловыделения	5	30
Степанов Р.Н., Шеков А.А., Плотникова Г.В., Кузнецов К.Л., Тимофеева С.С. Идентификация следов инициаторов горения в продуктах термического разложения ламинатов методом флуоресцентного анализа	4	27

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ		
Гвоздев Е.В. Постановка проблемы по рациональному распределению ресурса, предназначенного для обеспечения комплексной безопасности предприятия.	2	35
Степанов Е.В., Тараканов Д.В., Топольский Н.Г. Волновой алгоритм определения оптимального маршрута движения газодымозащитников в зданиях при пожарах и задымлениях	3	31
Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я., Семиков В.Л. Модель эффективности реагирования в иерархической системе управления по оценкам готовности пожарных подразделений. . . .	5	42
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА		
Лебедченко О.С., Пузач С.В., Зыков В.И. Эффективность применения вспучивающихся огнезащитных покрытий силовых кабелей каналов систем безопасности атомных станций в условиях пожара.	4	36
БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ		
Назаров В.П., Корольченко Д.А., Швырков С.А., Тангиев М. М. Особенности оценки уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров перед проведением огневых работ.	6	52
Плотникова Г.В., Кузнецов К.Л., Тимофеева С.С., Морозов Р.О., Шеков А.А. Теплые полы как причина возникновения пожаров.	3	41
БЕЗОПАСНОСТЬ ЗДАНИЙ, СООРУЖЕНИЙ, ОБЪЕКТОВ		
Королева Л.А., Хайдаров А.Г., Ивахнюк Г.К., Актерский Ю.Е. Применение потенциала горючести и эксергетического показателя для оценки пожарной опасности грузов железнодорожного транспорта	1	16
Полевое И.И., Нехань Д.С. Решение теплотехнической задачи огнестойкости центрифугированных железобетонных колонн.	2	49
Присадков В.И., Мусликова С.В., Ушаков Д.В., Абашкин А.А., Присадков К.В. Пожарная безопасность двухэтажных храмов	3	65
Присадков В.И., Ушаков Д.В., Абашкин А.А., Зуева А.С. Экраны вокруг проемов в перекрытиях общественных зданий	1	32
Пузач С.В., Еремина Т.Ю., Корольченко Д.А. Определение фактических пределов огнестойкости стальных конструкций с учетом реальной пожарной нагрузки	6	61
Цариченко С.Г., Островой А.В., Карасев С.В., Пугачев М.Л. Исследования возможности применения беспилотных авиационных систем для пожаротушения высотных зданий и сооружений	3	54
Швырков С.А., Юрьев Я.И., Петров А.П., Назаров В.П. Расчет фактического предела огнестойкости ограждающей стены с волноотражающим козырьком группы мазутных резервуаров.	6	73
Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В. Расчет требуемых пределов огнестойкости строительных конструкций технологических этажерок предприятий нефтегазовой отрасли на основе оценки времени, требуемого для эвакуации и спасения персонала при пожаре.	5	58
БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ		
Пузач С.В., Мустафин В.М., Акперов Р.Г. Новый подход к расчету времени блокирования путей эвакуации по потере видимости в дыму при пожаре в помещении.	3	76
Холщевников В.В., Парфененко А.П. Интенсивность движения людских и транспортных потоков (обзор).	4	48
СТАТИСТИКА И СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ		
Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Григорьева М.П. О пожарной безопасности в сельской местности России.	6	87

Фамилии авторов и названия статей	Номер журнала	Стр.
Титов С.А., Барбин Н.М., Кобелев А.М. Анализ аварийных ситуаций, связанных с пожарами на атомных электростанциях	5	66
АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ И СРЕДСТВА		
Малыгин И.Г., Таранцев А.А. Об обеспечении безопасного следования автомобиля экстренной службы в сложных дорожных условиях	6	97
Рукин М. Тепловизионный индикатор критического состояния «Снегирь» как средство сверх-раннего обнаружения места пожара или перегрева оборудования	2	71
Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Бабилов И.А., Поляков Д.В. О расчетной оценке эффективности тушения пожара класса В спринклерными автоматическими установками	3	88
Танклевский Л.Т., Таранцев А.А., Зыбина О.А., Бабилов И.А. Об оценке эффективности спринклерной автоматической установки пожаротушения	1	42
Членов А.Н., Буцынская Т.А. Тенденции развития приемно-контрольных приборов для систем пожарной сигнализации	5	76
СРЕДСТВА И СПОСОБЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ		
Корольченко Д.А., Пузач С.В. Оценка механизмов тушения горючих жидкостей тонкораспы-ленной водой	1	54
Корольченко Д.А., Пузач С.В. Учет механизма тушения пламени в интегральных и зонных моделях расчета динамики опасных факторов пожара в помещении	2	78
Куприн Д.С., Поляков А.С. О точности и достоверности сравнительной оценки эффективности переносных огнетушителей при пожаротушении конструкционных и отделочных материалов автомобилей	2	88
Осипенко С.И., Кокшаров А.В. Увеличение устойчивости противопожарной пены путем вос-полнения жидкой фазы при орошении	4	65
Пустовалов И.А. Экспериментальное исследование огнетушащей способности модульных уста-новок пожаротушения тонкораспыленной водой, модифицированной астраленами	5	84
Роев В.В., Чистяков Т.И., Тараканов Д.В., Халиков Р.В. Оценка электропроводимости струй температурно-активированной воды с дозированием ингибирующей соли для тушения электрооборудования газокompрессорных станций	1	64
ДИСКУССИИ		
Ершов А.В., Коробко В.Б. Новые ориентиры профессиональной культуры лиц, регулирующих отношения в области пожарной безопасности	4	74
Ершов А.В., Коробко В.Б. О проблеме перехода государственного управления в техносфере на новую риск-ориентированную модель на примере обеспечения пожарной безопасности	2	98
Ершов А.В., Коробко В.Б. Проблема актуального социального регулирования в техносфере на примере пожарной безопасности	1	75
ВОПРОС-ОТВЕТ		
Харламенков А.С. Пожарная опасность больших переходных сопротивлений. От теории к прак-тике. Часть 1	6	108
Харламенков А.С. Сухая трава и мусор в обновленной пожарной статистике	5	98
Харламенков А.С. Целесообразность применения огнезащитных кабельных покрытий	4	90
Харламенков А.С. Целесообразность применения устройств защиты от дугового пробоя	2	117
Харламенков А.С. Электропроводка во взрывоопасных зонах	1	86

Николай Григорьевич ТОПОЛЬСКИЙ

17.04.1945–23.11.2021



23 ноября 2021 г. на 77-м году жизни скончался Заслуженный деятель науки РФ, академик Национальной академии наук пожарной безопасности (НАНПБ) и Российской академии естественных наук (РАЕН), доктор технических наук, профессор, почетный профессор Академии ГПС МЧС России и ряда зарубежных вузов, почетный работник высшего профессионального образования РФ, полковник внутренней службы в отставке **ТОПОЛЬСКИЙ Николай Григорьевич**.

Николай Григорьевич родился 17 апреля 1945 г. в ст. Родниковская Курганского района Краснодарского края.

В 1967 г. окончил Таганрогский радиотехнический институт, с 1967 г. работал в этом институте инженером, ведущим конструктором, доцентом и заведующим лабораторией. В 1971 г. в Таганрогском радиотехническом институте защитил кандидатскую диссертацию, а в 1984 г. в Институте проблем управления РАН — докторскую диссертацию. Обе диссертации посвящены проблемам математического моделирования и декомпозиционным методам синтеза цифровых автоматов на основе программируемых матричных микроэлектронных вычислительных структур.

С 1988 г. работал в Академии Государственной противопожарной службы МЧС России, занимал должности начальника кафедры специальной электротехники автоматизированных систем и связи (СЭАСС), начальника учебно-научного комплекса автоматизированных систем и информационных технологий, заместителя начальника Академии по научной работе, профессора кафедры информационных технологий.

Известный российский ученый в области автоматизированных интегрированных систем комплексной и пожарной безопасности. По его предложению с 1995 по 2000 г. в государственной номенклатуре научных специальностей впервые в стране была учреждена отдельная научная специальность «Пожарная безопасность» как автономное и независимое научное направление, что позволило придать существенный импульс развитию научных исследований в данном направлении в этот период.

Основатель и руководитель международной научной школы, в которой подготовлено 65 докторов и 35 кандидатов наук для России, Вьетнама, Польши и Белоруссии. Лично подготовил 16 докторов и 40 кандидатов наук.

Автор более 720 научных работ — монографий, учебных пособий, статей и иных трудов. Много лет был председателем редакционного совета научного интернет-журнала «Технологии техносферной безопасности». Член редколлегии нашего журнала «Пожаровзрывобезопасность», а также изданий «Безопасность жизнедеятельности», «Технологии гражданской безопасности», РЖ «Пожарная охрана», «Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация».

По предложению Николая Григорьевича Топольского журнал «Пожаровзрывобезопасность» расширил свою тематику — была введена рубрика «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Долгие годы он выступал в качестве строгого, но справедливого рецензента. На страницах нашего журнала Николай Григорьевич публиковал и результаты своих научных работ и своих учеников.

По его инициативе реализована идея проведения ежегодной международной научно-технической конференции «Системы безопасности», в которой за 30 лет приняли участие представители более 40 стран мира.

Награжден орденом Почета, многими медалями России, Украины, Польши, Германии, Болгарии и других стран, золотой медалью ВДНХ, знаками «За развитие научно-исследовательской работы студентов», «За обеспечение пожарной безопасности особо важных государственных объектов», «Лучшему работнику пожарной охраны», «За отличную службу в МВД», знаком МЧС РФ «За заслуги» и многими другими.

Лауреат четырех премий Национальной Академии наук пожарной безопасности (НАНПБ) за научные монографии, учебные пособия и комплекс программ для ЭВМ.

Редакция журнала понесла невосполнимую утрату и с глубоким прискорбием прощается с Николаем Григорьевичем Топольским, талантливым ученым и организатором, добрым, трудолюбивым и отзывчивым человеком. Память о нем навсегда сохранится в наших сердцах, сердцах его коллег, друзей и учеников.

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ!

Направляемые в журнал «ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТЬ/FIRE AND EXPLOSION SAFETY» статьи должны содержать результаты научных исследований и испытаний, описания новых технических устройств и программно-информационных продуктов; обзоры, комментарии к нормативно-техническим документам, справочные материалы и т.п. Авторы должны указать, к какому типу относится их статья:

- научно-теоретическая;
- научно-эмпирическая;
- аналитическая (обзорная);
- дискуссионная;
- рекламная.

Не допускается направлять в редакцию работы, которые были опубликованы и/или приняты к печати в других изданиях.

Редакция просит авторов при подготовке рукописи руководствоваться изложенными ниже правилами.

1. Статья и сопутствующие ей материалы должны быть направлены через электронную редакцию по адресу info@fire-smi.ru.

Статья должна быть ясно и лаконично изложена и подписана всеми авторами (скан страницы с подписями). Основной текст статьи должен содержать в себе четкие, логически взаимосвязанные разделы. Все разделы должны начинаться приведенными ниже заголовками, выделенными полужирным начертанием. Для научной статьи традиционными являются следующие разделы:

- введение;
- материалы и методы (методология) — для научно-эмпирической статьи;
- теоретические основы (теория и расчеты) — для научно-теоретической статьи;
- результаты и их обсуждение;
- заключение (выводы).

Редакция допускает и иную структуру, обусловленную спецификой конкретной статьи (аналитической (обзорной), дискуссионной, рекламной) при условии четкого выделения разделов:

- введение;
- основная (аналитическая) часть;
- заключение (выводы).

Подробную информацию о содержании каждого из обозначенных выше разделов см. на сайте издательства www.fire-smi.ru.

Материал статьи должен излагаться в следующем порядке.

2.1. Номер УДК (универсальная десятичная классификация).

2.2. Заглавие статьи (на русском и английском языках). Заглавия научных статей должны быть точными и лаконичными и в то же время достаточно информативными; в них можно использовать только общепринятые сокращения. В переводе заглавий статей на английский язык недопустима транслитерация с русского языка, кроме непереводаемых названий собственных имен, приборов и других объектов, имеющих собственные названия, а также непереводаемый сленг, известный только русскоговорящим специалистам. Это касается также аннотаций, авторских резюме и ключевых слов.

2.3. Информация об авторах.

2.3.1. Имена, отчества и фамилии всех авторов. Они должны приводиться полностью на русском языке и в транслитерации в соответствии с системой, которая в настоящее время является наиболее распространенной (<http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>).

Авторами являются лица, принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в сносках.

2.3.2. Ученые степени, звания, должность, место работы всех авторов с полным юридическим адресом (на русском и английском языках). Здесь необходимо указать: полное официальное название организации, страну, индекс, город, название улицы, номер дома,

а также контактные телефоны и электронные адреса всех авторов; дать информацию о контактном лице. Обращаем Ваше внимание, что при переводе необходимо указывать официально принятое название организации на английском языке. Все почтовые сведения (кроме наименования улицы, которое должно быть в транслитерированном виде) должны быть также переведены на английский язык, в том числе название города и страны.

Пример: *Institute for Problem in Mechanics, Russian Academy of Sciences (Vernadskogo Avenue, 101, Moscow, 119526, Russian Federation).*

2.3.3. ORCID, Researcher ID, Scopus Author ID.

2.4. Расширенное резюме на русском и английском языках. Необходимо иметь в виду, что авторское резюме на английском языке в русскоязычном издании является для иностранных ученых и специалистов основным и, как правило, единственным источником информации о содержании статьи и об изложенных в ней результатах исследований. Поэтому авторское резюме должно быть:

- информативным (не содержать общих слов);
- содержательным (должно отражать существенные результаты работы; не должно включать материал, который отсутствует в основной части публикации);
- структурированным (т.е. следовать логике описания результатов в публикации);
- грамотным (написанным качественным английским языком, без использования программ автоматизированного перевода);
- объемом не менее 200–250 слов.

Структура резюме должна повторять структуру статьи и включать четко обозначенные подразделы Введение (Introduction), Цели и задачи (Aims and Purposes), Методы (Methods), Результаты (Results), Обсуждение (Discussion), Заключение (выводы) (Conclusions).

Результаты работы следует описывать предельно точно и информативно. При этом должны приводиться основные теоретические и экспериментальные результаты, фактические данные, установленные взаимосвязи и закономерности.

Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, гипотезами, описанными в работе.

Текст должен быть связным; излагаемые положения должны логично вытекать одно из другого.

Сокращения и условные обозначения, кроме общепотребительных, следует применять в исключительных случаях или давать их расшифровку и определение при первом упоминании в тексте резюме.

В авторское резюме не следует включать схемы, таблицы, иллюстрации, формулы, а также ссылки на публикации, приведенные в списке литературы к статье.

Для повышения эффективности при онлайн-поиске включите в текст аннотации ключевые слова и термины из основного текста и заглавия статьи.

2.5. Ключевые слова на русском и английском языках (не менее 5 слов или коротких словосочетаний). Они указываются через точку с запятой. Недопустимо в качестве ключевых слов использовать термины общего характера (например, проблема, решение и т.п.), не являющиеся специфической характеристикой публикации. Используемые в заголовке слова и термины не нужно повторять в качестве ключевых слов: ключевые слова должны дополнять информацию в заголовке. При переводе ключевых слов на английский язык избегайте по возможности употребления слов «and» (и), «of» (предлог, указывающий на принадлежность), артиклей «a», «the» и т.п.

2.6. Основной текст статьи должен быть набран через 1,5 интервала в формате Word. Формулы должны быть набраны в Microsoft Equation или MathType.

Цитируемый текст из других публикаций следует брать в кавычки. Таблицы, рисунки, методы, численные данные (за исключением общеизвестных величин), опубликованные ранее, должны сопровождаться ссылками.

Если представленные в статье исследования выполнены авторами при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Российского научного фонда, Министерства образования и науки Российской Федерации и т.п., то в конце статьи обязательно следует дать информацию об этом с указанием номера и названия гранта (научного проекта, госконтракта и т.д.).

Сокращения и условные обозначения физических величин в тексте статьи должны соответствовать действующим международным стандартам. Формулы и буквенные обозначения должны быть четкими и ясными. Все буквенные обозначения, входящие в формулы, должны быть расшифрованы с указанием единиц измерения. Размерность всех характеристик должна соответствовать системе СИ. Иллюстрации в электронной версии прилагаются отдельно. Фотографии должны быть сделаны с хорошего негатива контрастной печатью (файлы растровых изображений предоставляются с разрешением не менее 300 dpi, черно-белая штриховая графика — 600 dpi). Файлы векторной графики следует предоставлять в формате той программы, в которой они созданы, либо печатать PDF-файл из этой программы. Все иллюстрации должны иметь сквозную нумерацию. Чертежи и карты в качестве иллюстраций неприемлемы. Ссылки на все рисунки в тексте обязательны.

Таблицы должны быть составлены лаконично и содержать только необходимые сведения; однотипные таблицы следует строить одинаково. Цифровые данные необходимо округлять в соответствии с точностью эксперимента. Сведения в таблицах и на рисунках не должны повторяться. Ссылки на все таблицы в тексте обязательны.

В журнале предусматривается двуязычное представление табличного и графического материала, поэтому необходимо прислать перевод на английский язык:

- для таблицы: ее названия, шапки, боковика, текста во всех строках, сноска и примечаний;
- для рисунка: подписочной подписи и всех текстовых надписей на самом рисунке;
- для схемы: подписи к ней и всего содержания самой схемы.

2.7. Пристайные списки литературы на русском языке и языке оригинала (если книга переводная).

Список литературы должен включать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок. Литература должна быть оформлена в виде общего списка в порядке упоминания. В тексте ссылка на литературу отмечается порядковой цифрой в квадратных скобках, например [1]. Библиографические данные приводятся по титульному листу издания. Порядок изложения элементов библиографического описания определяется требованиями ГОСТ 7.1-2003 и ГОСТ Р 7.0.5-2008.

В описании источников необходимо указывать всех авторов.

Наряду с этим для научных статей список литературы должен отвечать следующим требованиям.

Список литературы должен содержать не менее 20 источников (в это число не входят нормативные документы, патенты, ссылки на сайты компаний и т.п.). При этом количество ссылок на статьи из иностранных научных журналов и другие иностранные источники должно быть не менее 40 % от общего количества ссылок. Не более половины от оставшихся 60 % должны составлять статьи из русскоязычных научных журналов, остальное — другие первоисточники на русском языке.

Не менее половины источников должно быть включено в один из ведущих индексов цитирования: Российский индекс научного цитирования eLibrary, Web of Science, Scopus, Chemical Abstracts, MathSciNet, Springer и др. В случае присвоения публикациям цифрового идентификатора объекта (DOI) его необходимо указать, что позволит однозначно идентифицировать объект в базах данных.

Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из научных журналов или других публикаций.

В списке литературы должно быть не более 30 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи.

Следует обратить внимание на публикации диссертаций (особенно докторских), защищенных в последние годы по ближайшей научной специальности или группе специальностей. Для поиска рекомендуется использовать ресурс <http://www.dissercat.com>.

Не следует включать в список литературы ГОСТы; ссылки на них должны быть даны непосредственно по тексту статьи.

Убедитесь, что указанная в списке литературы информация (Ф.И.О. автора, название книги или журнала, год издания, том, номер и количество (интервал) страниц) верна.

Неопубликованные результаты, проекты документов, личные сообщения и т.п. не следует указывать в списке литературы, но они могут быть упомянуты в тексте.

2.8. References (пристайные списки литературы на английском языке). Представление в References только транслитерированного (без перевода) описания недопустимо. Обращаем Ваше внимание, что перевод названия статей следует давать так, как он проходил при их публикации, а перевод названий журналов должен быть официально принятым. Произвольное сокращение названий источников цитирования приведет к невозможности идентифицировать ссылку в электронных базах данных.

При составлении References необходимо следовать схеме:

- ИОФ авторов (транслитерация; для ее написания используйте сайт <http://fotosav.ru/services/transliteration.aspx>, обязательно включив в настройках справа сверху флажок «Американская (для визы США)»; если автор цитируемой статьи имеет свой вариант транслитерации своей фамилии, следует использовать этот вариант);
- заглавие на английском языке — для статьи, транслитерация и перевод названия — для книги;
- название источника (журнала, сборника статей, материалов конференции и т.п.) в транслитерации и на английском языке (курсивом, через косую черту);
- выходные данные;
- указание на язык изложения материала в скобках (например, (in Russian)).

Например: D.N. Sokolov, L.P. Vogman, V.A. Zuykov. Microbiological spontaneous ignition. *Pozharnaya bezopasnost / Fire Safety*, 2012, no. 1, pp. 35-48 (in Russian) (Другие примеры см. www.fire-smi.ru).

3. Статьи, присланные не в полном объеме, на рассмотрение не принимаются.

4. В случае получения замечаний в ходе внутреннего рецензирования статьи авторы должны предоставить доработанный вариант текста в срок не более одного месяца с обязательным выделением цветом внесенных изменений, а также отдельно подготовить конкретные ответы-комментарии на все вопросы и замечания рецензента.

Несвоевременный, а также неадекватный ответ на замечания рецензентов и научных редакторов приводит к задержке публикации до исправления указанных недостатков. При игнорировании замечаний рецензентов и научных редакторов рукопись снимается с дальнейшего рассмотрения.

5. Непринятые к публикации статьи автору не возвращаются. Просьба редакции о переработке материала не означает, что он принят к печати. Предпечатная подготовка статей оплачивается за счет средств подписчиков и третьих лиц, заинтересованных в публикации.

Редакция оставляет за собой право считать, что авторы, представившие рукопись для публикации в журнале «Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety», согласны с условиями публикации или отклонения рукописи, а также с правилами ее оформления!